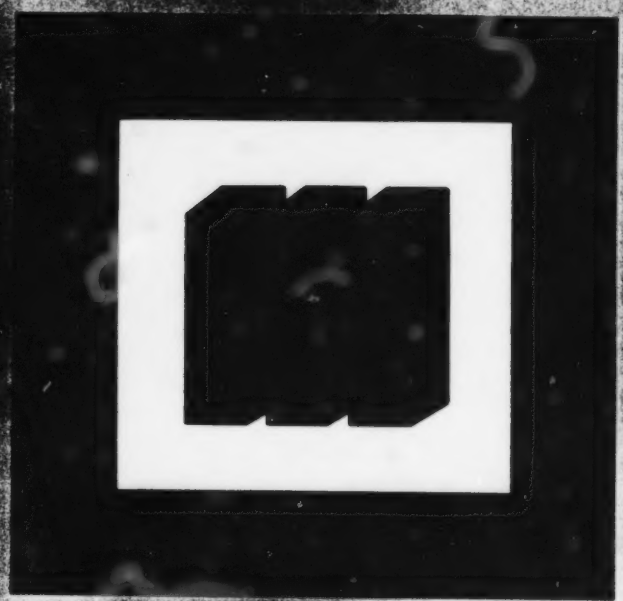
MANAGING CANADA'S NUCLEAR FUEL WASTES



Contents

Introduction 3

Highlights of the Development of Canada's Nuclear Fuel Waste Management Research Program 4

A Canadian Disposal Technology is Needed 6

The Beginning of Canada's Waste Management Program 8

Program Participants and Responsibilities 10

International Cooperation 12

The Aim of Canada's Waste Management Program 13

Used Nuclear Fuel 14

The Recycling Option 16

Storage 17

The Canadian Disposal Concept 18

Geoscience Research 24

Environmental Research 28

Disposal Facility Engineering 30

Transportation 32

Environmental and Safety Assessments 34

Learning From Nature 36

Provisions for Review and Public Hearings 38

Options for the Future 41

List of Publications 42

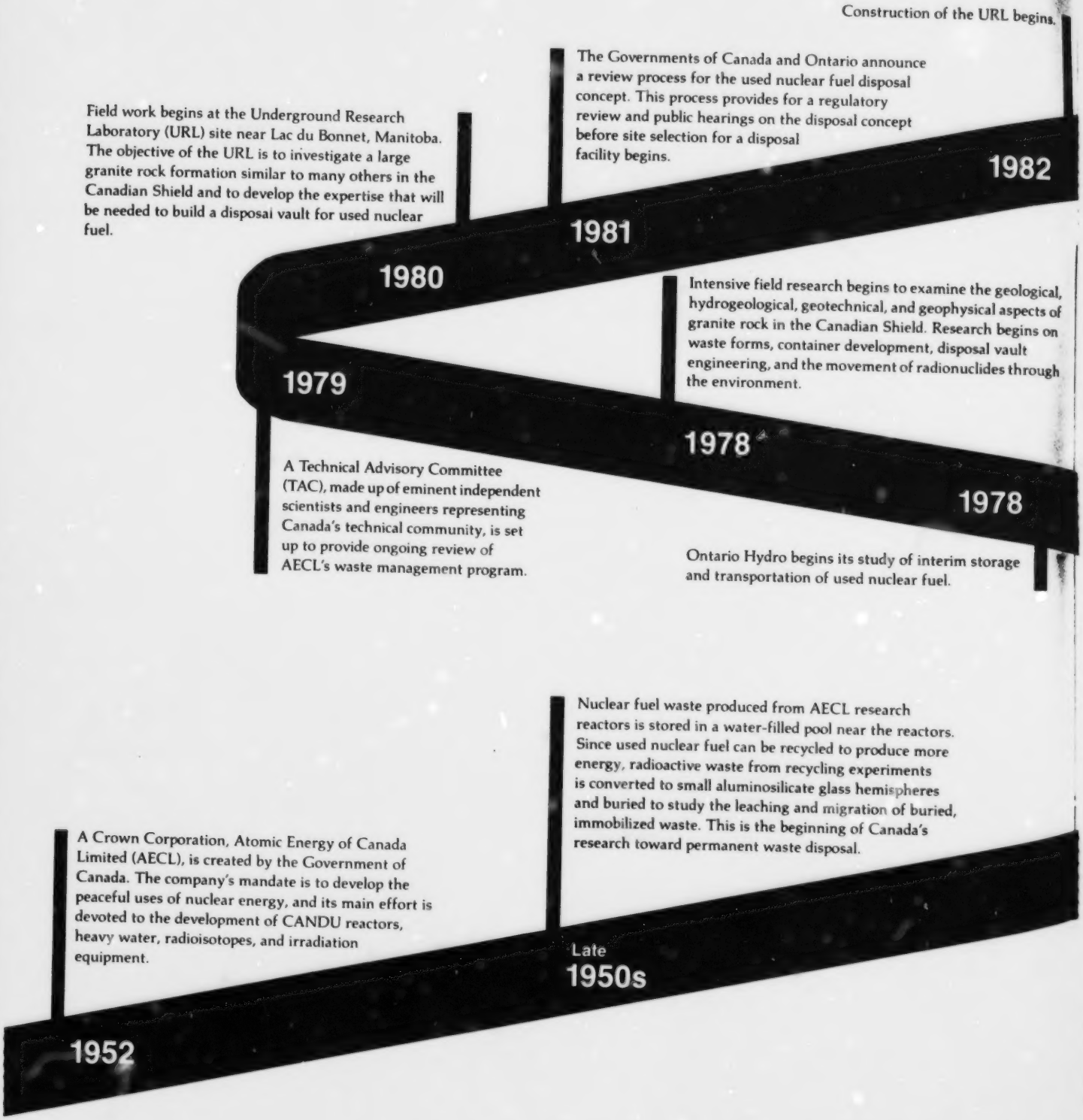
Index 44

Part of the inherent price of human progress
is the requirement to deal with an increasing variety and quantity of wastes
generated by man's productive industrial activities. Since some of these wastes
have the potential for harming man and the natural environment
they must be carefully controlled.

The generation of electricity from nuclear power
produces some wastes that are radioactive.
These wastes are now stored safely at reactor sites.
Methods to dispose of nuclear fuel wastes permanently
so that any potential for harm
is reduced to a negligible level are being developed
by the nuclear industry.

The proposed concept for disposal is described in this booklet.
What nuclear fuel wastes are, their potential hazards to man,
the methods being developed to dispose of them safely, and
the review process that will influence decision-making
about the acceptability of the disposal concept
are explained in the following pages.

Highlights of the Development of Canada's Nuclear Fuel Waste Management Research Program



1975

Scientists and engineers design, develop, and demonstrate dry storage of used nuclear fuel in concrete canisters as an alternative to storage in water-filled pools. Research shows that either type of storage would be safe for many decades.

1977

The Hare report addresses options for the permanent disposal of nuclear fuel waste for the Government of Canada. It recommends that burial in granite rock in the Canadian Shield be further investigated. Rock salt is the second option.

1978

AECL begins its assessment of the concept of waste disposal deep in the Canadian Shield.

1978

The Governments of Canada and Ontario announce a joint program to assess and develop the technology for the safe management and permanent disposal of nuclear fuel waste in the granite rock of the Canadian Shield.

1978

The Ontario Royal Commission on Electric Power Planning concludes that temporary storage in water-filled pools is safe but recommends that permanent disposal in granite rock be pursued.

1982

The first interim assessment of the waste disposal concept is issued to scientific, regulatory, and public groups for comment.

1986

The second interim assessment of the disposal concept is issued to scientific, regulatory, and public review groups for comment.

1987

Used fuel transportation casks are developed and tested by Ontario Hydro and licensed by the AECB.

1987

Two parliamentary standing committees investigate high-level nuclear waste disposal in Canada and issue reports.

1988

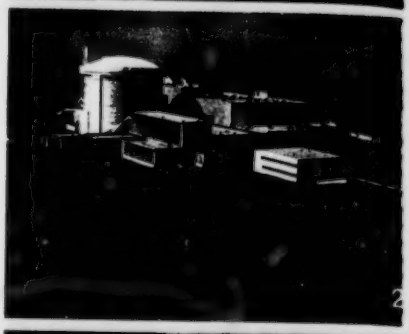
The Minister of Energy, Mines and Resources refers the waste disposal concept to the Minister of the Environment for review by an Environmental Assessment Panel under the Environmental Assessment and Review Process (EARP).

A Canadian Disposal Technology Is Needed

When Canadian scientists began to harness the power of nuclear fission in the 1950s and 1960s, they were faced with the challenge of designing nuclear generating stations that could produce electricity economically, reliably, and safely. The Canadian nuclear industry proceeded through several demonstration stages to the construction of the Pickering Nuclear Generating Station east of Toronto. This was the first large-scale application of nuclear power in Canada. The success of the Pickering station in the early 1970s resulted in additional stations. By 1990-91 nuclear generated electricity in Ontario will supply more than 60 percent of that province's electricity. Nuclear generating stations also contribute to the electrical power supply of Quebec and New Brunswick.

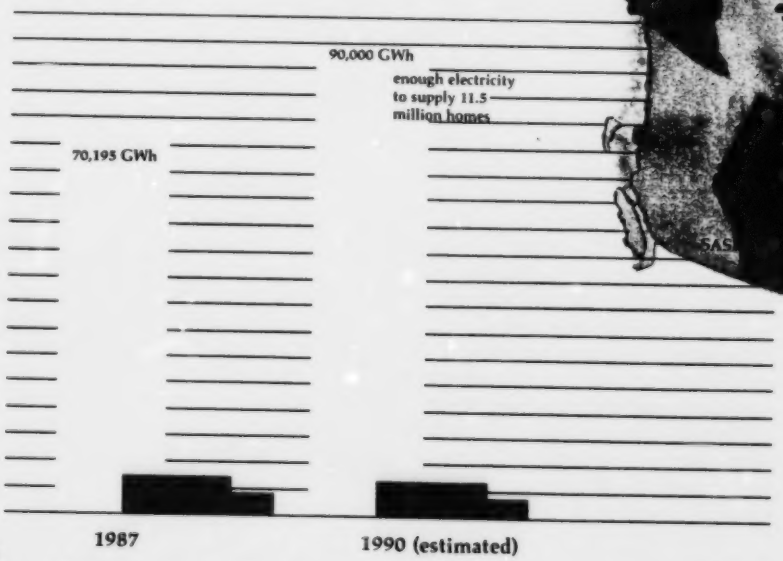
From the beginning it was recognized that small amounts of used nuclear fuel containing highly radioactive materials would be left over from the generation of nuclear power and that these materials would have to be kept out of the environment. The used fuel is stored at the reactor sites. It is safely contained and can be stored for decades. However, long-term surface storage means that future generations would have to monitor the used fuel and maintain and eventually rebuild the storage facilities. The governments of Canada and Ontario have decided to develop the technology for a permanent disposal system that would not place the burden of managing the used fuel on future generations.

Ontario Hydro is constructing the Darlington Nuclear Generating Station near Bowmanville, east of Toronto, Ontario. This four-unit station, located on Lake Ontario, will provide over 3500 MW of electricity when in full operation. The first unit at Darlington is scheduled to be in service in 1989. All four units should be operational by 1992-93.



The New Brunswick Electric Power Commission owns and operates the Point Lepreau Generating Station which is located on the Bay of Fundy coast. The 680 MW station is the first of the CANDU-6 series. Nuclear energy from Point Lepreau supplies about 30 percent of New Brunswick's electrical energy requirements. It produced its first electricity in 1982, and up to 1986 its output was over 18 billion kilowatt hours. To produce this amount of electricity from oil would have required over 28 million barrels at a cost of over $900 million.

Gentilly-2 is a CANDU-6 nuclear electric generating station located along the St. Lawrence River across from Trois-Rivières, Quebec. It is owned by Hydro-Que



The amount of electricity produced from nuclear power generating stations in Ontario, New Brunswick, and Quebec in 1987. By 1990 nuclear generated electricity in Ontario is projected to reach more than 60% of all electricity produced.

Ontario
New Brunswick
Quebec

Ontario Hydro's Pickering Nuclear Generating Station is situated on Lake Ontario east of Toronto, Ontario. The station has eight CANDU reactors with a combined capacity of approximately 4300 MW. Since the first CANDU unit came into service at Pickering in 1971, Ontario reduced its purchase of coal by more than $2 billion to supply Ontario residents with electricity. In 1985 nuclear stations in Ontario displaced 16 million tonnes of coal which would have been imported from the U.S. Nuclear power is an important element in reducing emissions from coal-fired stations which cause acid rain. Ontario Hydro's nuclear program prevents 1.5 million tonnes per year of acid gas emissions.

Ontario Hydro's Bruce Nuclear Power Development (BNPD) is situated on Lake Huron near the town of Kincardine. The total gross electrical generating capacity for this site is approximately 7000 MW. This makes BNPD the largest nuclear power site in the Western world.

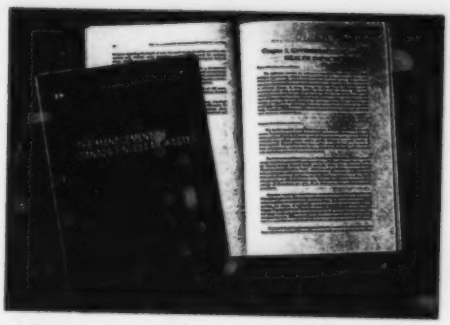
The Beginning of Canada's Waste Management Program

In 1977 Energy, Mines and Resources Canada initiated a study, led by Professor F. K. Hare of the University of Toronto, to identify disposal methods suitable for implementation in Canada. This report, "The Management of Canada's Nuclear Wastes," provided the basis for government policy and the subsequent research program for the disposal of used nuclear fuel.

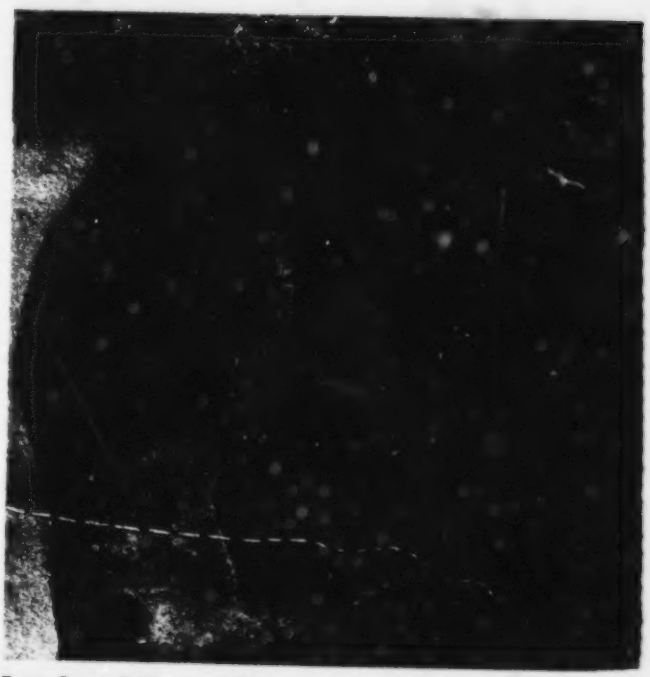
The Hare report dealt with burial in geological media as well as alternatives such as firing the waste into deep space or the sun, putting it in polar ice sheets, using surface disposal, or sealing it in canisters and putting them under the seabed. Of all the alternatives, burial in geological formations was considered to be the most feasible. The Task Force considered various geological media such as granite, bedded salt, clays, shales, and rocks of volcanic origin as well as abandoned mines and the subseabed. They recommended that Canada investigate the option of disposing of nuclear fuel waste deep in stable granite rock in the Canadian Shield.

The second option recommended was large salt deposits. However, most of these are located in provinces that do not have established nuclear power programs and many coincide with petroleum and potash deposits.

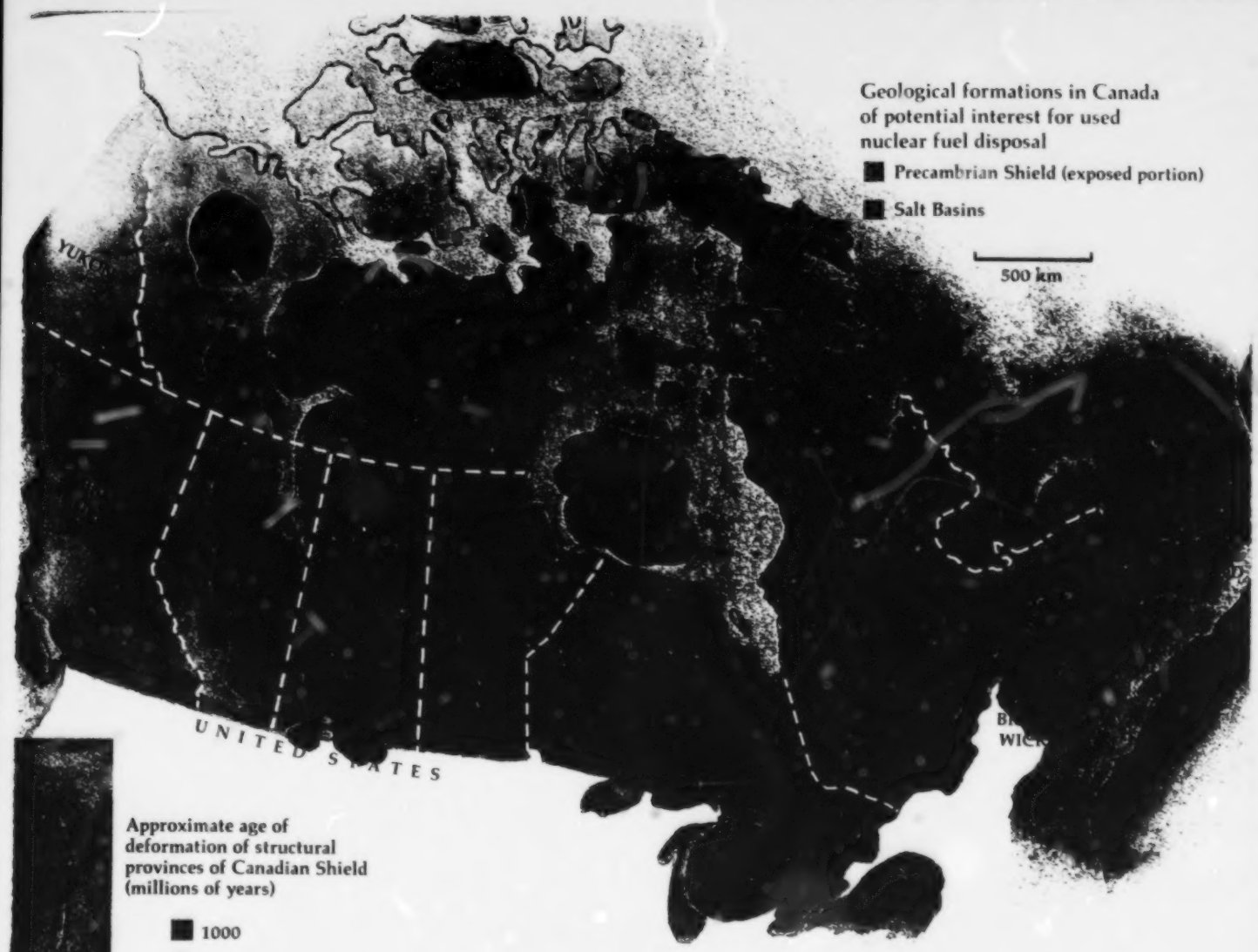
Between 1975 and 1980 the Ontario Royal Commission on Electric Power Planning examined all aspects of electrical power planning and reviewed reports on nuclear waste management by Dr. Hare and Dr. R. J. Uffen, Dean of Applied Science at Queen's University. The Commission, chaired by Dr. A. Porter, stated that the current practice of storing used fuel bundles in water-filled pools at the nuclear electric stations was safe and effective but emphasized the need to develop permanent disposal facilities to isolate nuclear waste from the world's ecosystems. The Commission recommended pursuing the Canadian concept for disposal in the granite rock of the Canadian Shield (Precambrian Shield).



What has come to be known as the "Hare report" has provided the basis for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program's research and development.



From Stern C.W., Carroll R.L., Clark T.H. *Geological evolution of North America*. 3rd ed., (John Wiley & Sons, 1979).



Granite rock in the Canadian Shield has remained stable for hundreds of millions of years and throughout a number of ice ages. Scientists believe that this rock will provide a suitable environment for the burial of Canadian used nuclear fuel because the rock will likely continue to be stable for millions of years into the future — much longer than the time required for the radioactivity of the buried used nuclear fuel to decrease to the level of natural uranium ore. Canada also has salt formations which were created between 400 million (western Canada, Ontario, and Hudson Bay) and 200 million (Manitoba) years ago, but these have not been extensively studied for the disposal of used nuclear fuel.

Based on the recommendations of the Hare study, the governments of Canada and Ontario, in 1978, launched the Nuclear Fuel Waste Management Program. Atomic Energy of Canada Limited (AECL), a federal Crown Corporation, was given the responsibility for assessing the concept of disposal of used fuel deep in the hard rock of the Canadian Shield and for developing and demonstrating the associated technologies. Ontario Hydro, a provincially owned utility, was asked to develop the technologies for the interim storage and transportation of used nuclear fuel.

In 1981 the governments announced that a technical review and public hearings would be held in the early 1990s to determine if the disposal concept is acceptable. Selection of a disposal site will not start until after this decision has been made.

Responsibility for the management of used nuclear fuel rests with its producers — the electrical utilities in Canada that operate nuclear power plants. For several years the utilities have been collecting a surcharge on nuclear generated electricity from their customers so they will be able to carry out their waste management responsibilities.

Ontario Hydro, New Brunswick Power, and Hydro Quebec all include a charge for waste disposal on their electricity bills. In Ontario, the retail price of electricity is about 6¢ per kWh and the charge for disposal less than 1 percent of this amount.

GOVERNMENT OF CANADA

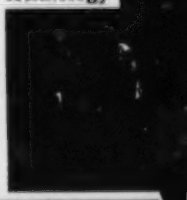
ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED

Responsible for developing technologies for immobilization and disposal of used fuel

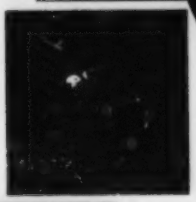
Research includes

Stability of used fuel

Container technology



Sealing and backfill materials

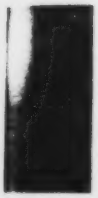


Geological barriers

Environmental research

Computer programs to assess how buried fuel would behave thousands of years into the future

Program Participants and Responsibilities for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program

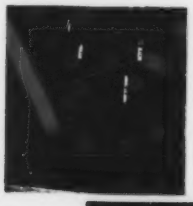


GOVERNMENT OF ONTARIO

ONTARIO HYDRO

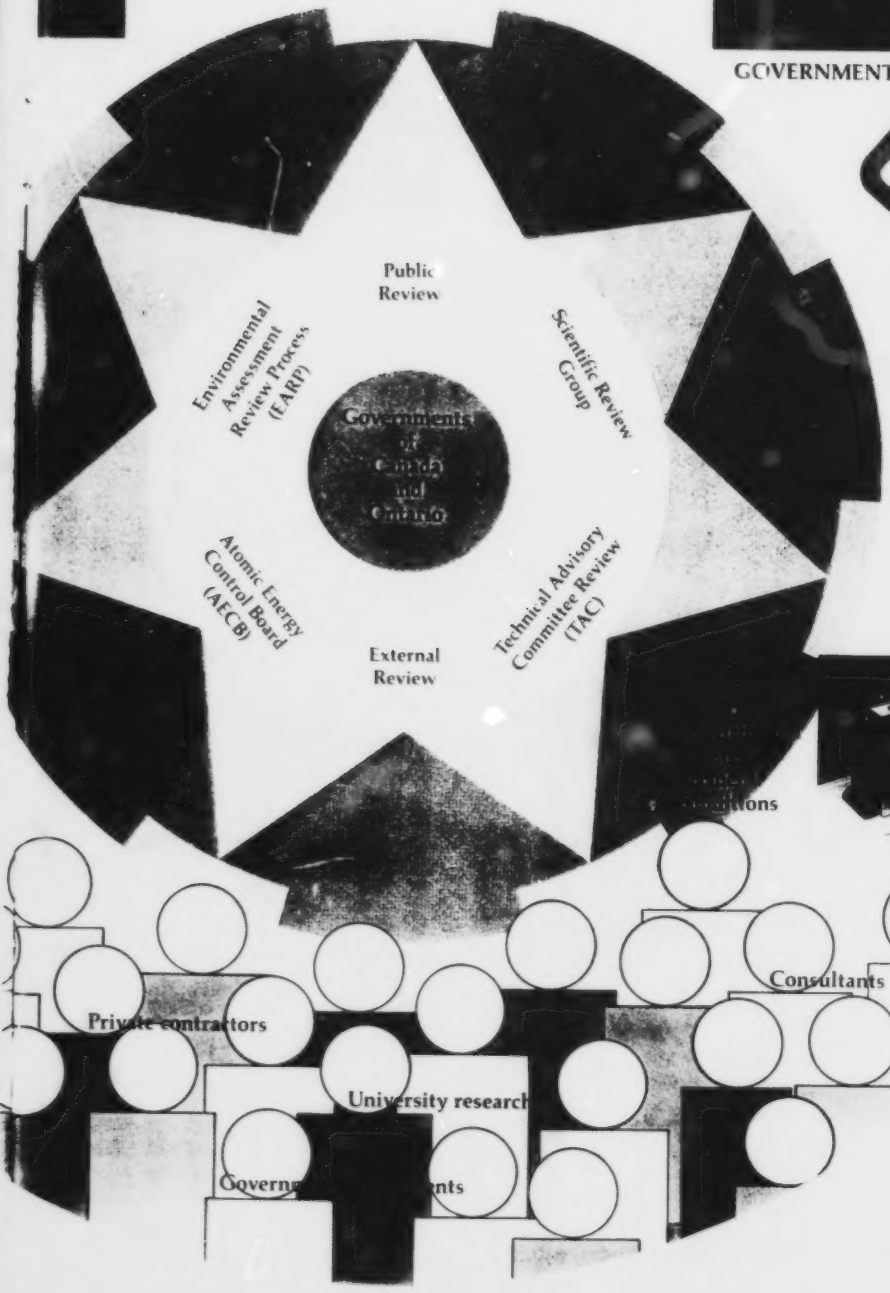
Responsible for developing technologies for interim storage and transportation of used nuclear fuel

Research includes



Storage — water-filled pools research and monitoring

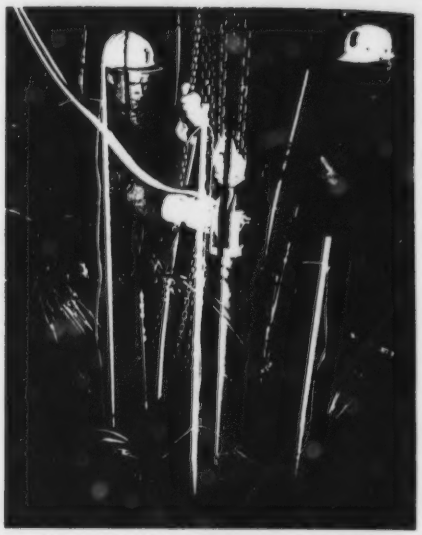
Assistance to AECL -- research and development



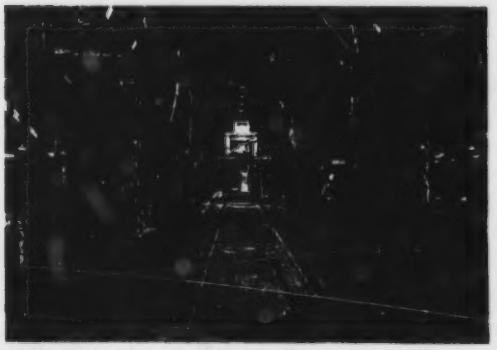
International Cooperation

Today, many countries with nuclear power programs are proposing some kind of underground geological disposal system. Canada closely monitors their research in other geologic media and participates in a scientific information exchange to keep up-to-date in other technology development while committing its major research resources to the investigation of granite rock.

Canada has formal exchange agreements on nuclear fuel waste management information with the United States, Sweden, Finland, and the Commission of European Communities. Canadian engineers and scientists also serve on international working committees with the Organization for Economic Cooperation and Development's Nuclear Energy Agency (OECD/NEA) and with the International Atomic Energy Agency of the United Nations.

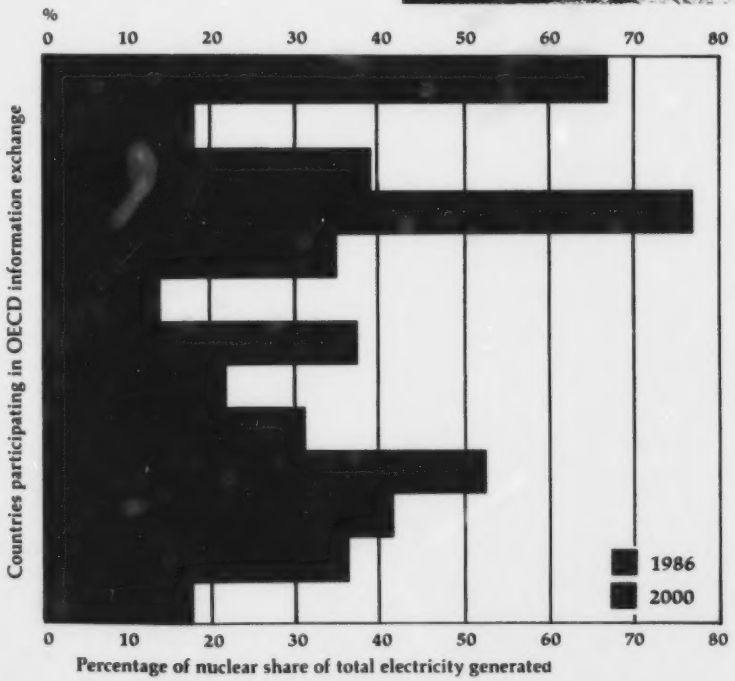


A test concerning the swelling properties of clay materials was conducted underground at Stripa, Sweden.

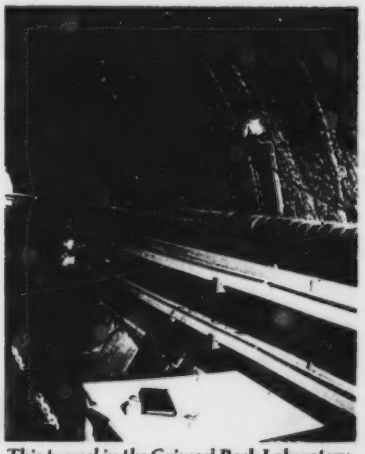


At the Climax Spent Fuel Test Facility on the Nevada test site in the United States a transport vehicle receives a used fuel canister which is lowered from the surface to 420 metres underground.

Possible disposal materials are being tested at the Waste Isolation Pilot Project in a salt formation at Carlsbad, New Mexico.



OECD Nuclear Energy Agency, *Electricity, Nuclear Power and Fuel Cycle in OECD Countries: Main Data*, (Paris, 1987) p. 26.



This tunnel in the Grimsel Rock Laboratory in Switzerland shows the water collection systems for a vertical fracture intersecting the tunnel.

The Aim of Canada's Waste Management Program

The overall objective of the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program is to develop and demonstrate a technology for the disposal of nuclear fuel waste that will ensure that there will be no significant adverse effect on man or the environment at any time.

The objective incorporates two basic principles: safety — the management of radioactive waste so that the hazards are negligible, and responsibility — the management of radioactive waste to minimize the need for involvement and concern of future generations for wastes that are produced today.

Used Nuclear Fuel

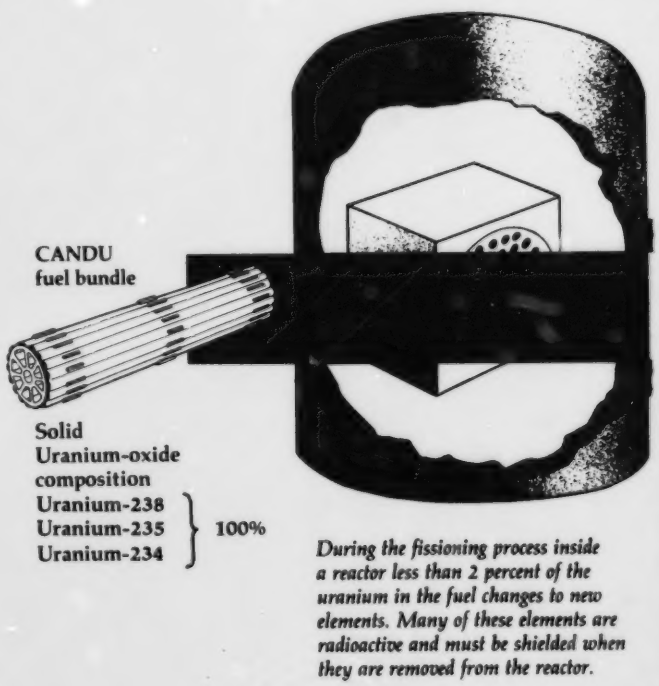
The fuel used to make electricity in CANDU reactors is uranium oxide (UO_2) refined from natural uranium ore. This material is pressed and sintered into solid ceramic pellets, each about the size and shape of a stack of 16 dimes. The pellets are sealed inside special metal (zirconium) tubes that are welded together to make a fuel bundle.

When fuel bundles are placed inside a reactor the uranium atoms in the fuel pellets split or fission causing new radioactive elements to be formed inside the fuel pellets. Eventually, these new elements interfere with the fission process and make the nuclear fuel bundle less efficient. After about 18 months in the reactor, when less than 2 percent of the uranium in the fuel bundles has changed into new elements, the fuel bundles are removed and put into water-filled storage pools. This used nuclear fuel is intensely radioactive and needs to be carefully managed. About a metre of concrete or rock or about 3 metres of water is enough to stop its radiation.

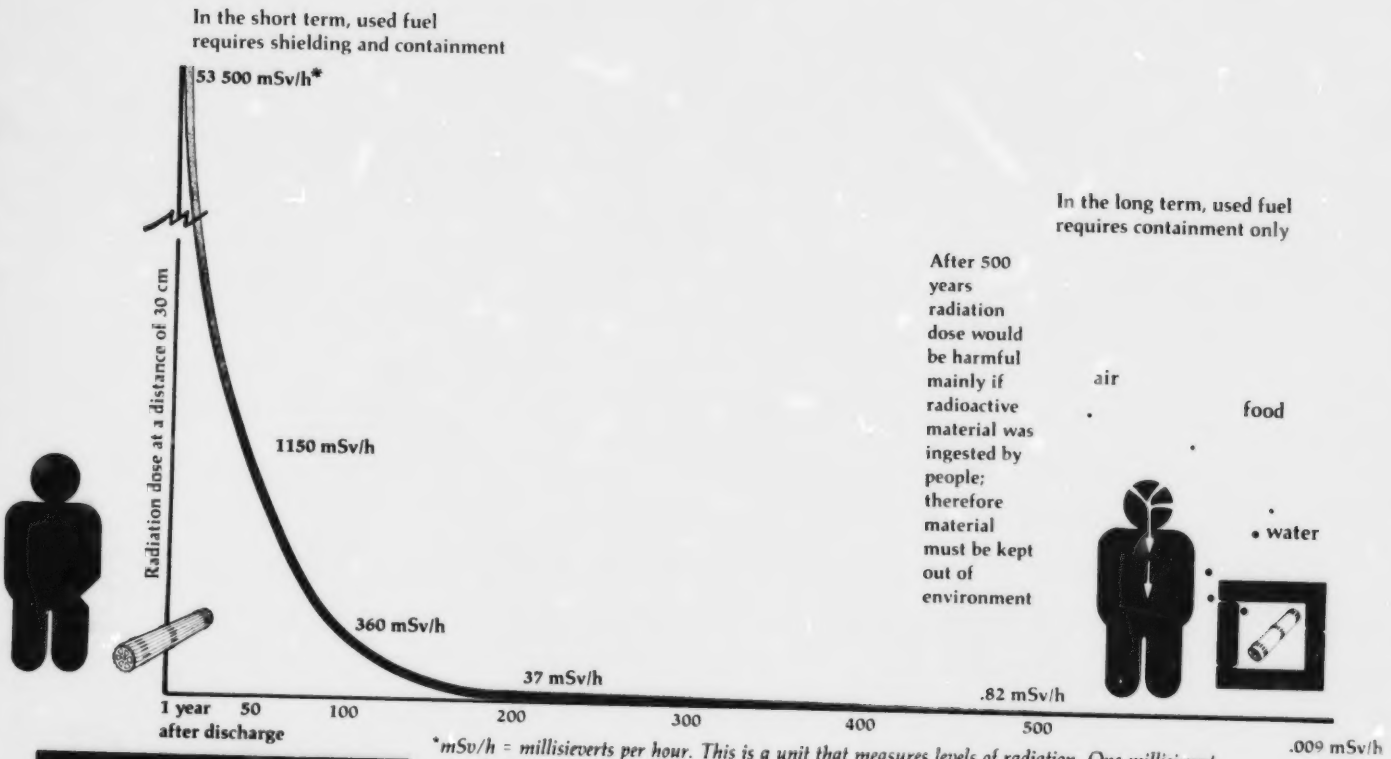
Because most of the new radioactive elements change to stable elements very quickly, the radioactivity decreases very quickly. In fact, within one hour of being removed from the reactor, the used fuel bundles have lost over 60 percent of their radioactivity. After 10 years the used fuel is 1000 times less radioactive than it was when first removed from the reactor.

After about 500 years, the penetrating radiation from a used fuel bundle will have decreased so much that people could be in the same room with it. However, some of the longer-lived elements in the used fuel give off radiation that has much less penetrating power, but could be harmful if ingested. Such elements could be hazardous if they get into our air, drinking water, or food. It is for this reason that used nuclear fuel should be permanently disposed of so that it will not reach our environment in sufficient quantities to harm people.

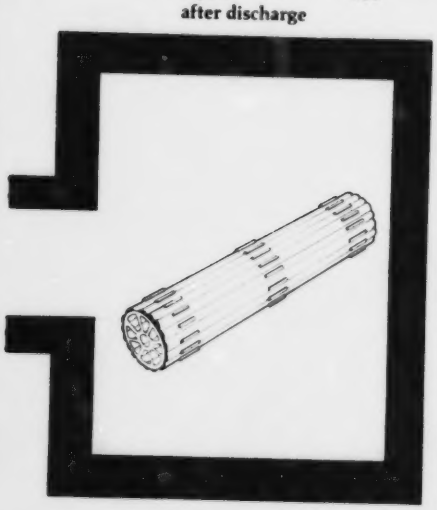
One of the advantages of nuclear power is that it takes very little fuel to produce a great deal of energy. One CANDU fuel bundle delivers as much energy as 400 tonnes of coal, or enough to supply the electrical needs of the average Canadian home for more than a hundred years. By the end of 1988, there were about 12 300 tonnes of used fuel in storage. That amount would fill one Olympic-size swimming pool. This is actually a small quantity of waste compared to the large amount of energy produced.



During the fissioning process inside a reactor less than 2 percent of the uranium in the fuel changes to new elements. Many of these elements are radioactive and must be shielded when they are removed from the reactor.



mSv/h = millisieverts per hour. This is a unit that measures levels of radiation. One millisievert of radiation produces a constant biological effect regardless of the type of radiation (See also p. 40).



Radioactive elements can be safely shielded by 1 m concrete or 3 m water

Used CANDU fuel is mainly the original uranium oxide. Only 0.65 percent is converted to new radioactive elements. The elements that emit penetrating gamma radiation mostly decay to stable elements in 500 years. The elements that emit less penetrating alpha and beta radiations last much longer but they are harmful to man only if ingested.

Used CANDU fuel composition

	Weight %	
Original (unchanged) uranium (U-238, U-235, U-234)	98.70%	
Other uranium (U-236, U-233, U-232)	0.08%	New radioactive elements 0.65%
Plutonium	0.40%	
Other actinides	0.01%	
Radioactive fission products	0.16%	
Stable fission products	0.65%	

The Recycling Option

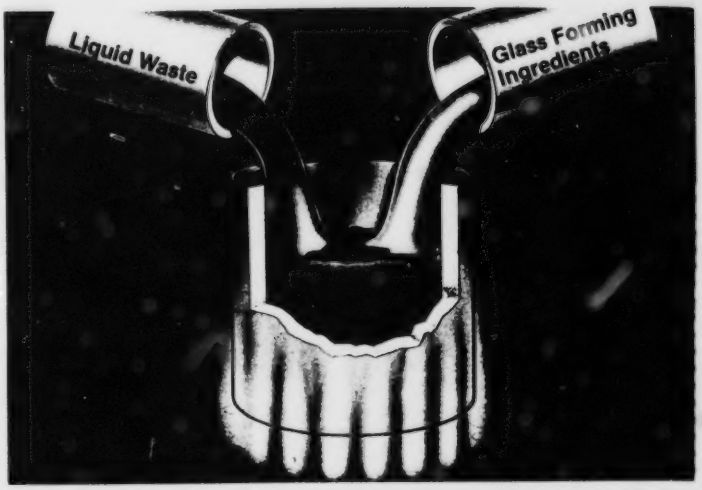
When uranium is fissioned in a reactor a small amount of a new element, plutonium-239, is created in the used fuel. If the plutonium-239 were chemically separated from the used fuel in a reprocessing plant it could be mixed with uranium to make new fuel, or used in a different fuel cycle.

Reprocessing plants operate commercially in France, Great Britain, Japan, and the Soviet Union. In Canada it is cheaper to mine uranium for new fuel rather than to recycle. However by 2000, the energy content of Canada's stored used fuel will exceed Alberta's estimated remaining conventional oil reserves.

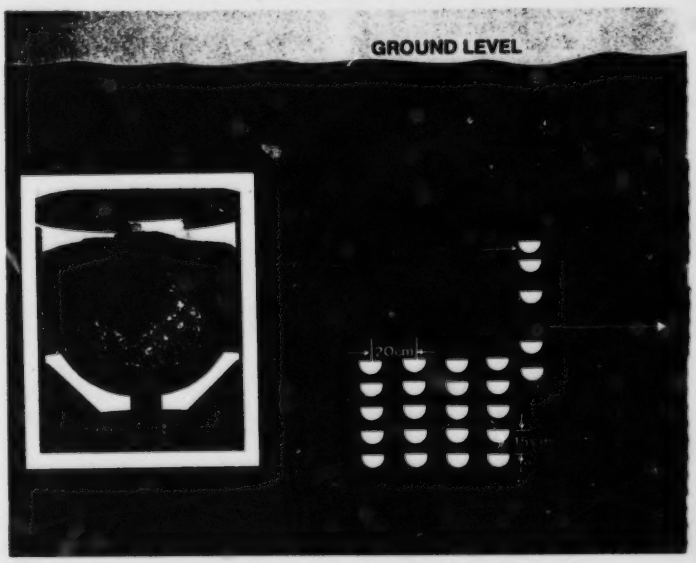
When used fuel is recycled, it is dissolved in acid and the useful elements are chemically separated. The remaining radioactive solution can be solidified and incorporated into a glass or ceramic. AECL studied this solidification technology in the 1960s and has conducted long-term experiments on the stability of glass as a waste form.

Recycling has been suggested as a way to reduce the volume of nuclear waste. However, upon examination of all relevant factors it is evident that recycling actually increases the volume of waste. It does not appear desirable to recycle used CANDU fuel strictly on the basis of the benefits to waste management.

Recycling of used CANDU fuel may become economically viable in the future only when uranium prices rise considerably. If Canada decides to build a reprocessing plant at that time, the technology for immobilizing the resulting waste will already be at hand. In fact, technologies for immobilizing such wastes in a durable glass are being used today on a commercial scale in France and Great Britain.



The process of recycling used CANDU fuel results in a liquid by-product containing radioactive waste. The basic objective is to convert this liquid into a stable, highly insoluble solid suitable for final disposal. The focus of the Canadian research is on developing and testing of processes for immobilizing the wastes and products (for example special glasses, ceramics, and glass-ceramics) that will ensure long-term isolation of recycle wastes.



To study the release of radioactive wastes immobilized in glasses, waste samples were buried under 4 metres of sandy soil in flowing groundwater. The waste dissolved so slowly that the water remained within drinking water standards at all times. More recent experiments have produced glass-ceramic waste forms similar to materials that have been stable in nature for long periods of time. Current Canadian technology is capable of producing waste forms that are 100 times less soluble than common window glass — approaching the durability of the original uranium dioxide fuel pellets.

Storage

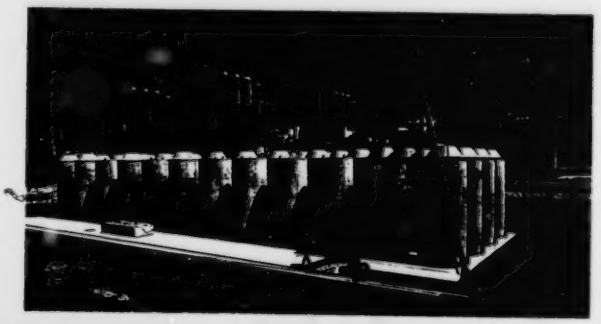
Used nuclear fuel is stored under water in large concrete pools at the generating stations where it is produced. The water shields the station personnel from the radiation and cools the fuel.

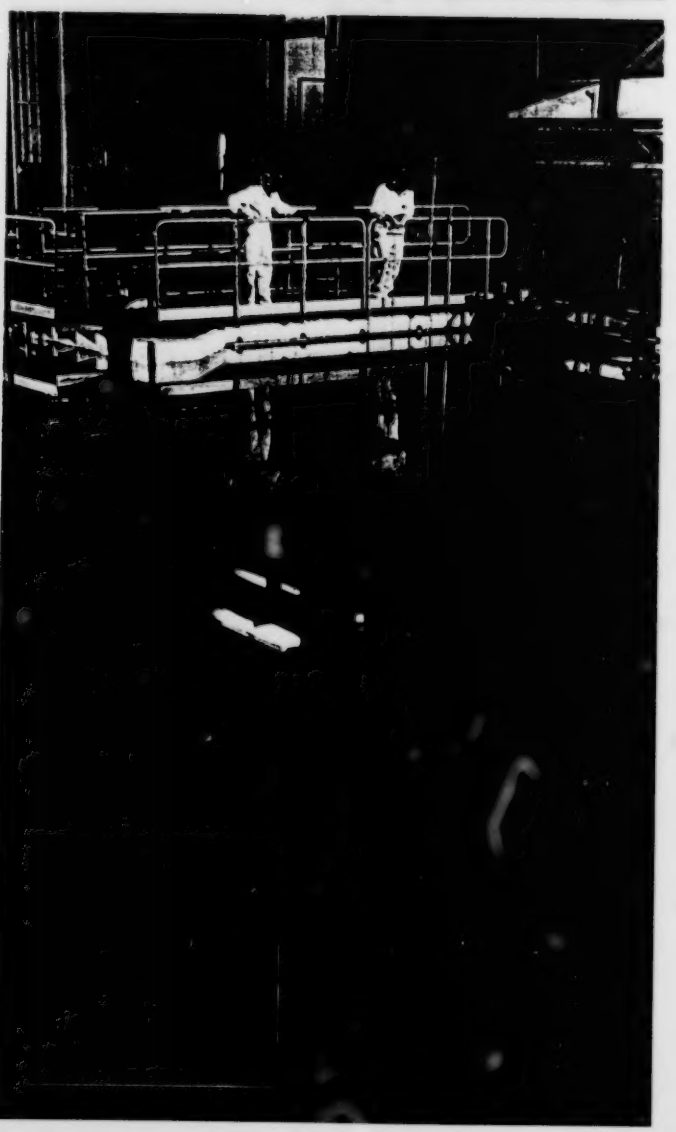
Used fuel has been stored under water in Canada for more than 30 years, and there is no evidence of any deterioration in the fuel. The water does not become radioactive, and there are filters to remove radioactive particles if one of the fuel bundles were to develop a small leak.

At AECL's Whiteshell Nuclear Research Establishment (WNRE) in Manitoba, at the prototype CANDU station at Douglas Point, and at the prototype Gentilly-1 nuclear power station, used nuclear fuel is being stored in concrete canisters. The Point Lepreau station in New Brunswick will also use this method to extend its storage capacity. A metre of concrete stops the penetrating radiation, and 2 sealed inner steel liners prevent radioactive material from escaping. Cooling is by natural convection.

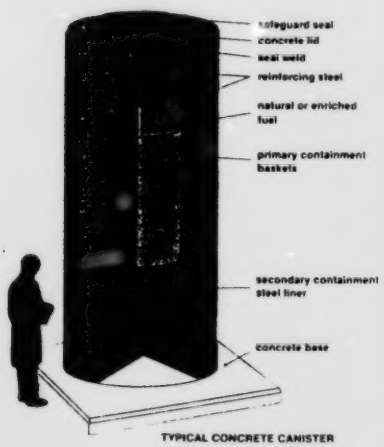
Both kinds of storage could be continued safely for many decades. Eventually, however, these storage systems will deteriorate and need care and maintenance. Maintenance would continue far into the future and the responsibility of maintaining this storage would pass to succeeding generations. Permanent disposal, on the other hand, would not require continuous care.

Concrete dry storage canisters at Douglas Point. An overhead crane is used to transfer used fuel to the canisters.





Radioactive used parts from the cores of Pickering reactors 1 and 2 are stored in concrete canisters at the Pickering station.



TYPICAL CONCRETE CANISTER

After the used fuel bundles have been cooled in water for about five years they can be transferred to above-ground storage canisters. These have one-metre-thick concrete walls to provide adequate shielding from the penetrating radiation.

This water storage pool at the Pickering station has stored radioactive used fuel bundles for over 15 years. Penetrating gamma radiation emitted by the used fuel bundles is shielded by about 3 metres of water above the used fuel. The inset shows a close-up of a stack of used fuel bundles.

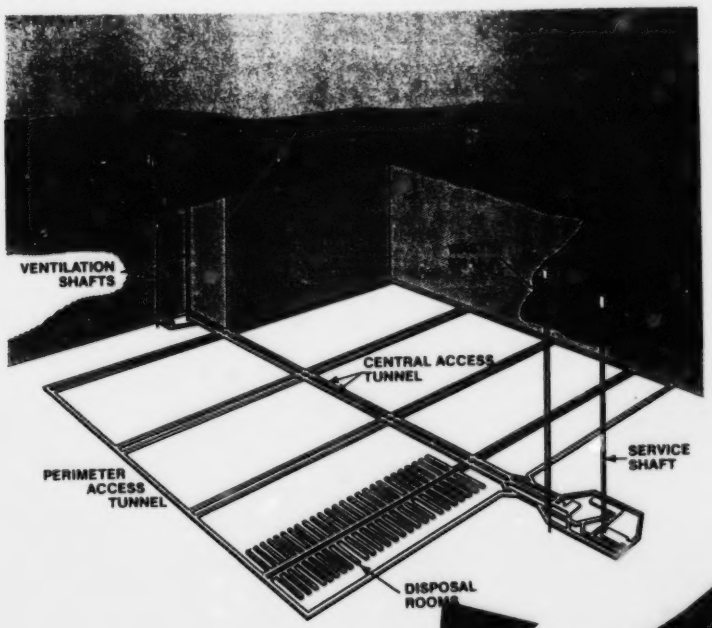
The Canadian Disposal Concept

The Canadian concept for permanent disposal of used fuel is based on containment deep in the stable rock of the Canadian Shield in much the same way that nature has contained uranium ore from the environment for hundreds of millions of years.

The disposal vault will in some ways resemble a deep mine. The used fuel (a solid ceramic that is difficult to dissolve) would be sealed inside corrosion-resistant containers. The containers would be placed in holes drilled in the floor of the disposal rooms. An underground network of tunnels and disposal rooms about 2 kilometres by 2 kilometres would be large enough to hold 191 000 tonnes of used fuel. Based on the installed and projected nuclear electrical capacity, a single disposal facility could accommodate Canada's used fuel to beyond the year 2035. A series of natural and engineered barriers would ensure long-term isolation of the radioactive materials in the used fuel.

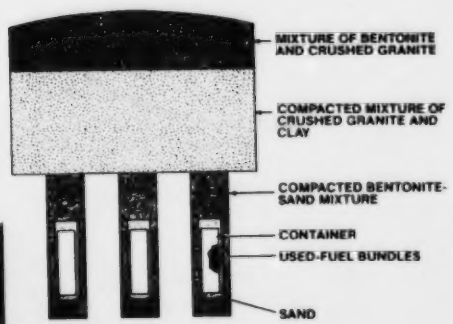
Since the only conceivable way that buried radioactive material can reach the environment is by being dissolved and transported in groundwater, it is important that the used fuel and containers are highly insoluble and surrounded with barriers that will block the movement of water and trap and retard radioactive materials that eventually escape.

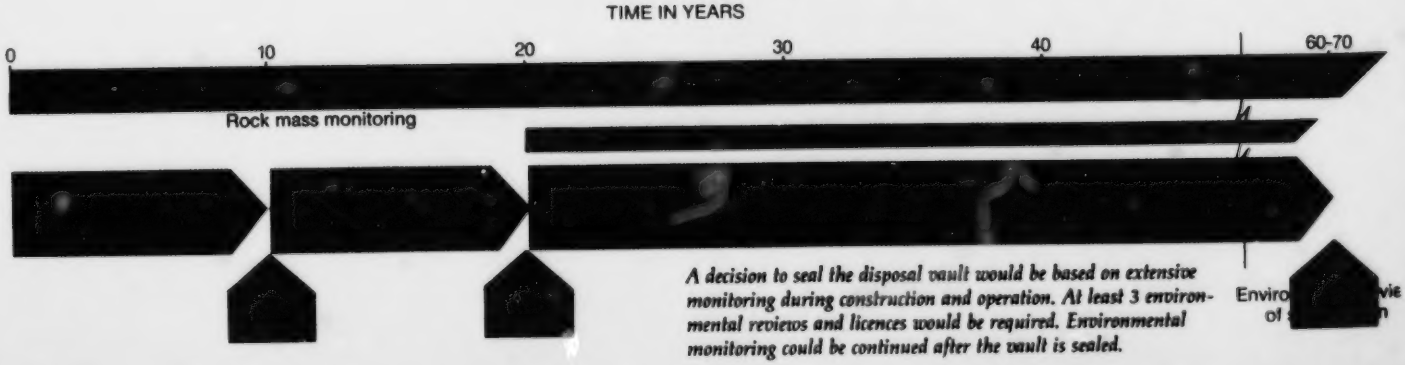
Long-term isolation of the nuclear fuel wastes would be provided by engineered barriers such as the **fuel** itself, the **container,** and the vault **backfilling** and **sealing** materials, as well as natural barriers such as the **rock** at the **depth** of 500 to 1000 metres.



The Canadian concept for the permanent disposal of used fuel is to bury the used fuel containers 500 to 1000 metres deep in the stable rock of the Canadian Shield.

CROSS SECTION THROUGH A TYPICAL DISPOSAL ROOM



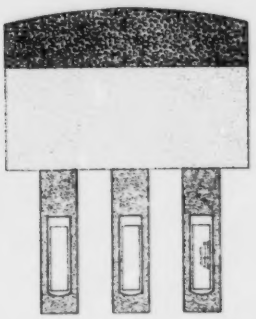


A decision to seal the disposal vault would be based on extensive monitoring during construction and operation. At least 3 environmental reviews and licences would be required. Environmental monitoring could be continued after the vault is sealed.

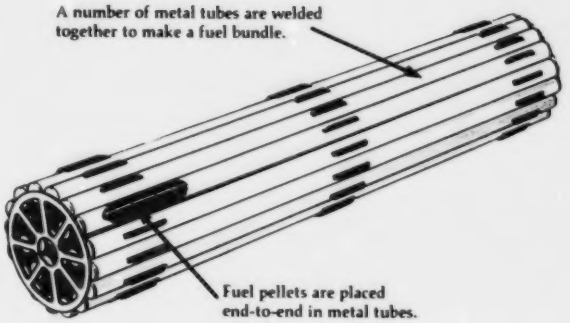
ENGINEERED BARRIERS
Used Fuel

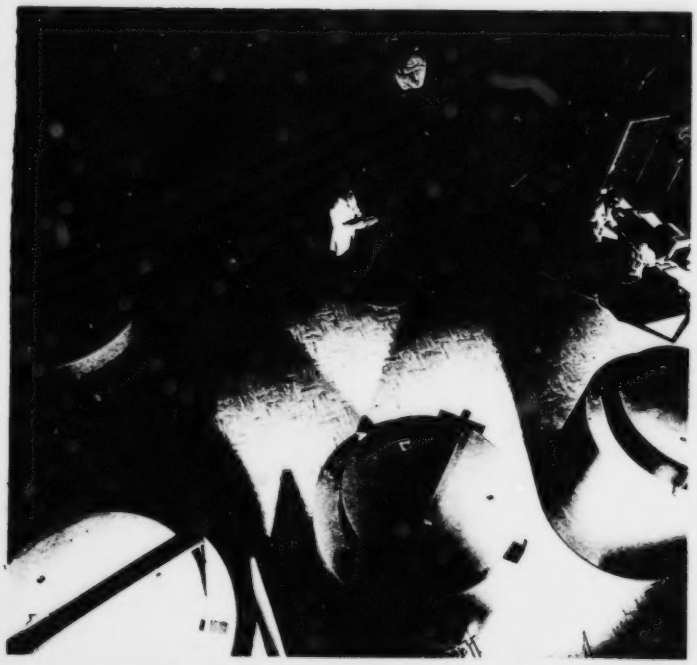
Most of the buried radioactive material would remain locked within the ceramic fuel pellets which are difficult to dissolve in water. Fuel pellets are sealed inside zirconium alloy tubes that may provide an additional barrier to water penetration. Studies to determine how the used fuel would behave under the temperature, pressure, and geochemical conditions of a disposal vault indicate that used fuel is an extremely stable waste form.

Barrier 1 USED FUEL

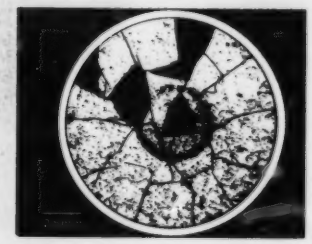


One effective barrier is the used fuel. Most of the radioactive material would remain locked in the ceramic fuel pellets which are highly resistant to dissolution in water. The pellets are sealed inside corrosion-resistant metal tubes which provide an additional barrier to the escape of radioactive material.

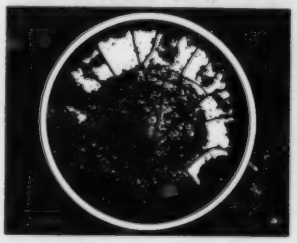




The Immobilized Fuel Test Facility (IFTF) was constructed to study the interactions between radioactive nuclear fuel wastes, natural rock barriers, and materials under consideration for the engineered barriers in an underground used nuclear fuel disposal vault. It contains 9 large concrete canisters to house experiments with highly radioactive materials and allows scientists to study the effects of water, heat, pressure, and radiation on the materials that may be used in a disposal vault.

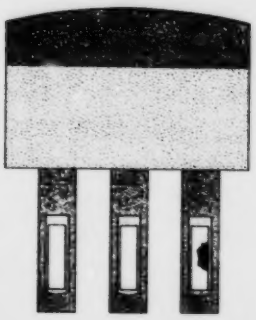


Fuel condition prior to leaching experiment



Fuel condition after exposure to water at 150 °C, 10MPa for one year. Dark regions are those affected by grain boundary leaching

Irradiation of the fuel produces a large number of radioactive elements with different chemical properties. The vast majority of the radioactive material produced (over 99 percent) is structurally contained within the insoluble ceramic fuel pellet (UO_2). The small fraction that escapes from the pellet is contained within the fuel element on the internal surface of the fuel cladding or in the cracks in pellets. This material would be rapidly released when the groundwater ultimately corrodes the container and the fuel cladding. Since this is expected to take at least 500 years, the majority of the radioactive material will have decayed to nonradioactive products.

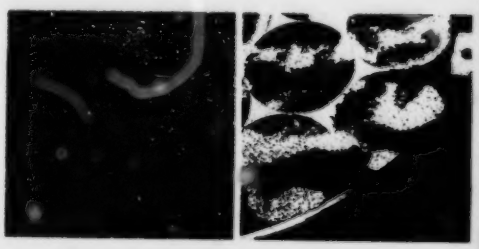


Containers

Special corrosion-resistant containers will act as another barrier between the used fuel and the environment. Test results so far show that titanium or copper containers would have the necessary corrosion properties to prevent access of groundwater for several hundred years. In the reference design, glass beads are compacted around the used fuel bundles and into the spaces between the fuel and the container shell to provide internal support against underground pressures. These containers have been designed to last for at least 500 years in the kind of groundwater found in the Canadian Shield.

This Hydrostatic Test Facility can simulate the pressure and temperature conditions that could exist in an underground disposal vault. It is used to evaluate the structural durability of possible container designs.

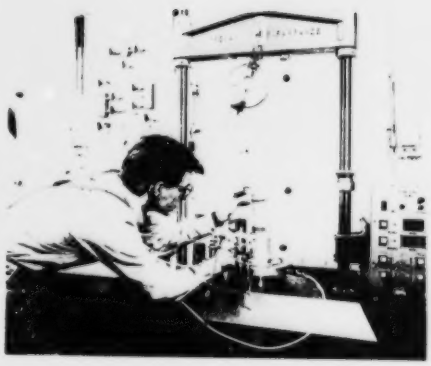
Glass beads packed around the used fuel bundles inside the container will provide internal support to prevent the walls of the container from collapsing under pressure in the disposal vault. Other materials for filling the containers, such as lead, have also been considered.



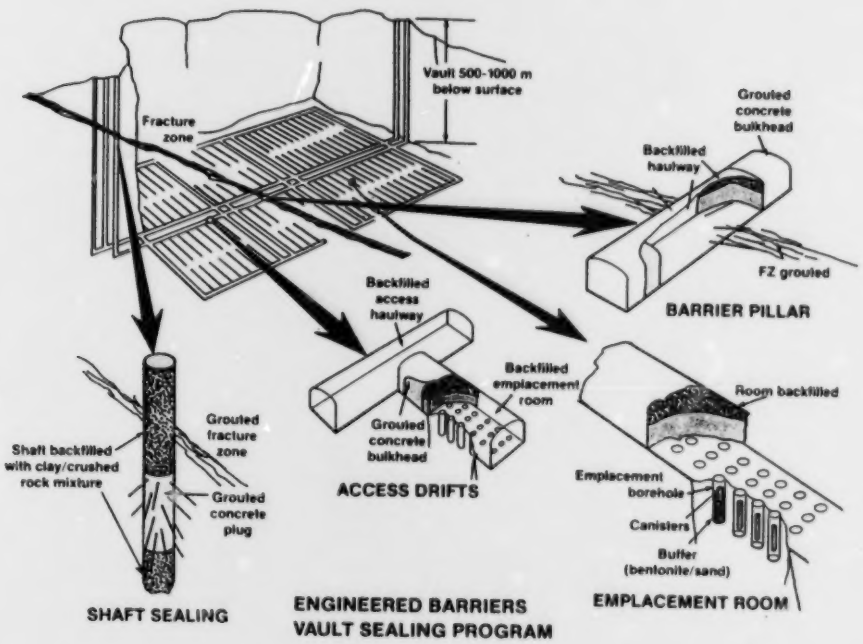
This prototype container for used fuel has been tested under a wide variety of conditions. It has a corrosion-resistant titanium shell. The used fuel bundles are stacked in carbon steel tubes inside the container and the spaces in between are filled with glass beads to provide internal support. Various container designs have been tested. The reference design is cylindrical in shape and will hold 72 used fuel bundles.

Vault Sealing

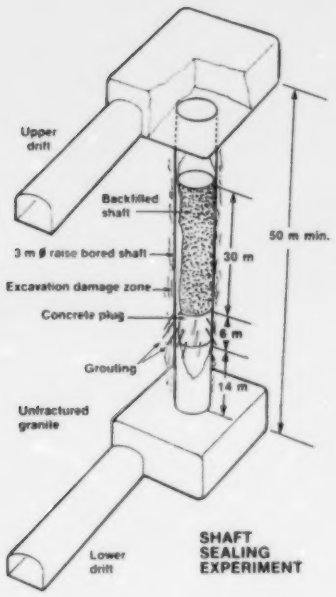
Special materials packed around the used fuel containers will further retard the migration of radioactive material. Research shows that a special mixture of clay-sand sealing materials packed around the containers has the ability to limit groundwater movement and trap escaping radioactive material. On contact with water the clay would swell and provide a seal around the containers. When groundwater eventually gets through and the container corrodes, the clay would retard the rate of movement of the dissolved waste particles. The rooms and tunnels of the disposal vault would be backfilled with similar clay mixed with sand and crushed rock. Any significant fractures in the rock around the vault would be grouted with clay or cement and shafts and boreholes would be similarly sealed. Full-scale shaft sealing and container sealing tests will be carried out in the Underground Research Laboratory (URL).



This triaxial compression machine is used to determine the strength of sealing and backfilling materials.

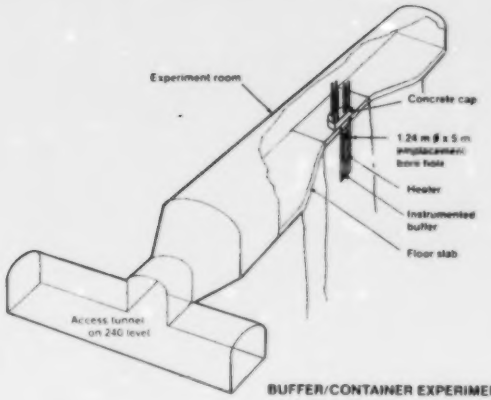


This figure illustrates the sealing strategies to be employed in a vault. Laboratory research and large scale experiments are being carried out in the URL to validate the performance of the sealing systems.



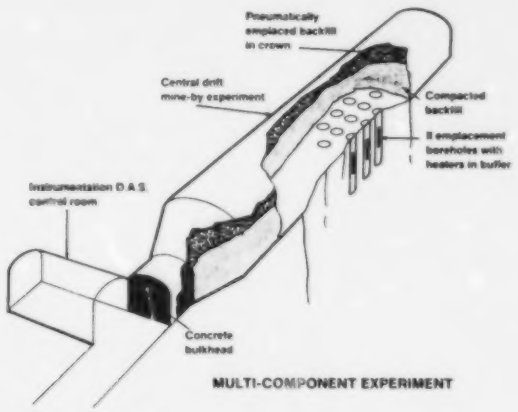
SHAFT SEALING EXPERIMENT

The shaft sealing experiment will study the ability of concrete plugs and clay-based backfills to seal shafts.



BUFFER/CONTAINER EXPERIMENT

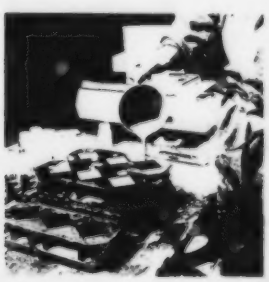
To evaluate how sealing materials and the rock respond to heat, an electric heater is placed in a compacted bentonite/sand mixture in the above experiment.



MULTI-COMPONENT EXPERIMENT

In this multi-component experiment an array of electric heaters will be placed in boreholes in the floor of a room at the URL. The room will be backfilled and the effects of heat on the performance of the backfill will be studied.

In order to determine where grout has penetrated, electromagnetic tomography is used to take a snapshot of the rock mass before and after grouting.

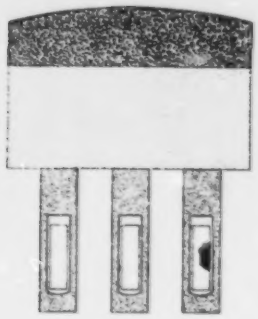


Grout quality control

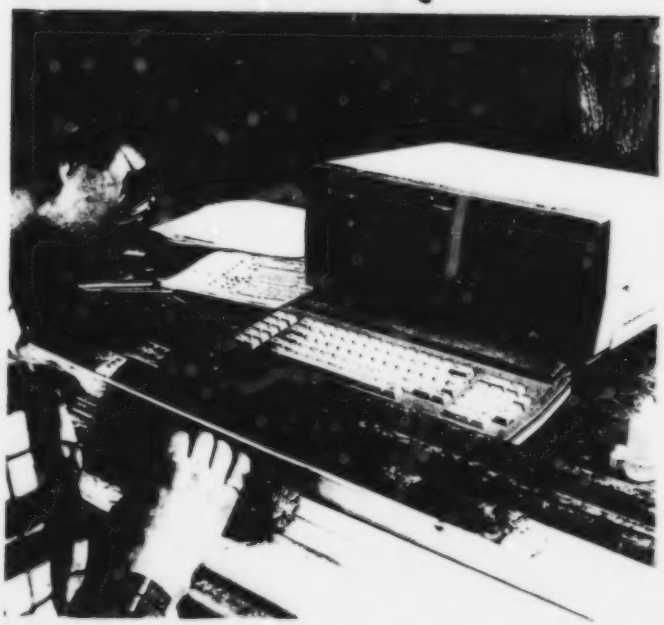
This acoustic emission sensing instrument was used in grouting experiments to determine remotely the location of grout penetration.

NATURAL BARRIER
Host Rock

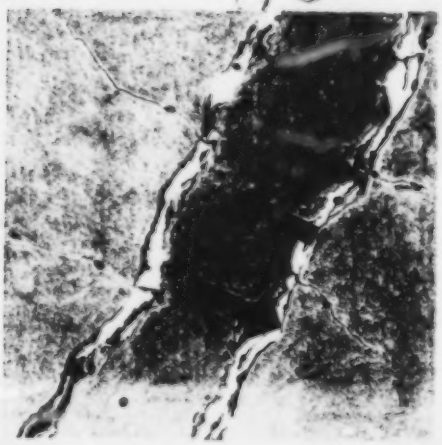
The rock itself would act as a further barrier since the disposal vault would be located in a stable granite rock with low groundwater movement. Chemical reactions between the rock and the dissolved waste would inhibit the movement of radioactive material.



Extensive surface mapping, drilling, and hydrogeological investigations have been carried out at these research areas in the Canadian Shield to obtain information about rock characteristics and groundwater flow.



The degree of fracturing of granite rock can be assessed by examining drill core samples from different drill sites in the Canadian Shield.



Information is being accumulated about how radioactive particles that were dissolved in groundwater would stick to fracture surfaces in the rock.

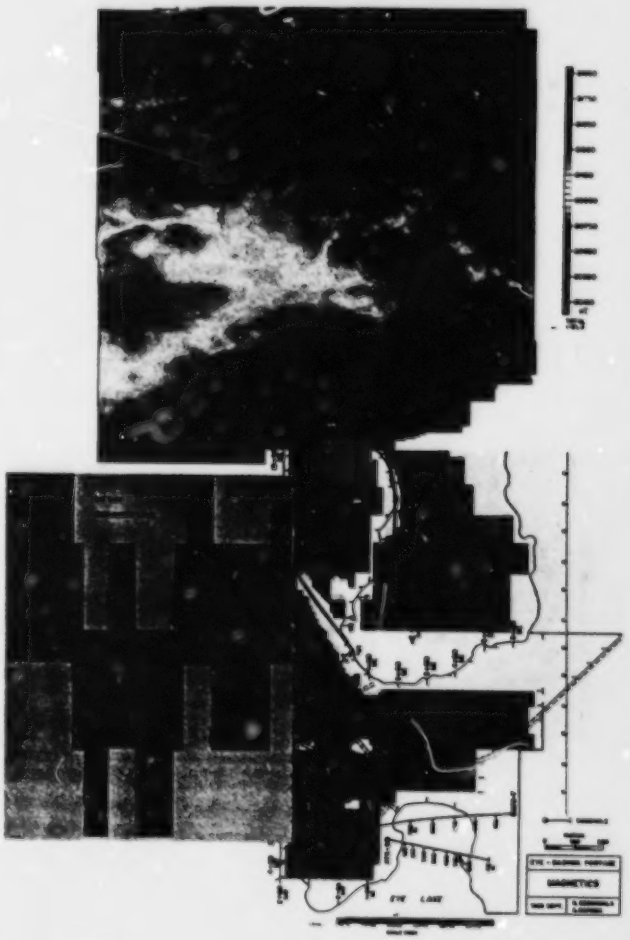
Geoscience Research

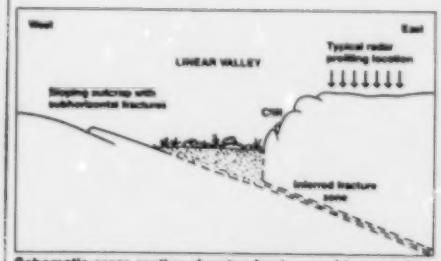
Choosing a safe disposal site in granite rock requires a comprehensive understanding of the rock's properties, how the groundwater moves through the rock, and how the rock and groundwater could interact with the used fuel. Tests have been conducted to determine the mechanical, physical, and chemical properties of the rock; the physical and chemical characteristics of groundwater; the nature of groundwater/rock/radionuclide interactions; the movement of groundwater through the rock; and the thermal stress caused by heat transfer from the fuel into the rock and mechanical stresses resulting from the excavated openings in the rock mass.

Detailed surface mapping, geophysical studies, deep exploratory drilling, and hydrogeological studies have been carried out at several research areas in the Canadian Shield. An Underground Research Laboratory known as the URL has been constructed near the Whiteshell Nuclear Research Establishment in Manitoba, and a regional hydrogeological study is underway in the surrounding area to develop an understanding of groundwater movement on a large scale. A technology has been developed that allows scientists to establish the geological and hydrogeological characteristics of rock masses to depths of 1000 to 1200 metres.

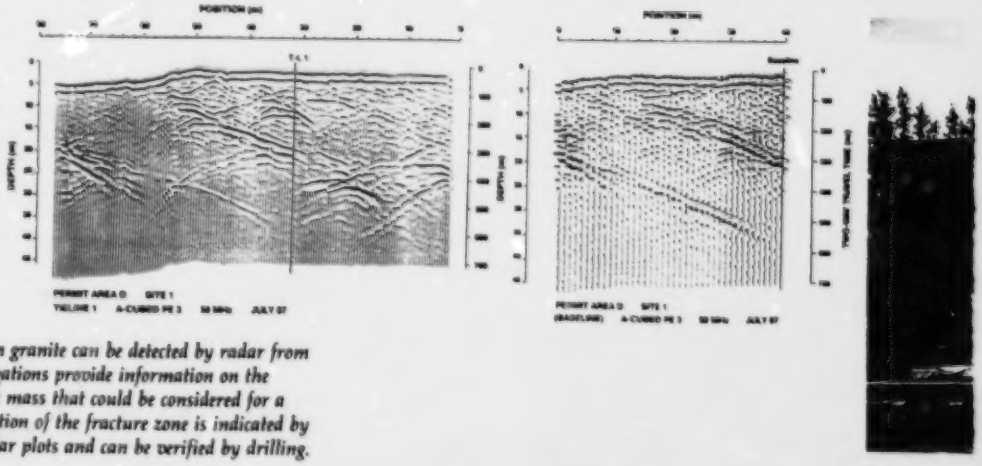
This site characterization and evaluation methodology can be used for granite rock formations exposed at the surface, as they are in the Canadian Shield, or for those beneath a covering layer of soil or other rock types. The research in the Shield indicates that many rock formations are potentially suitable for nuclear fuel disposal.

In order to determine if a site is suitable for a disposal facility scientists can carry out extensive site characterization investigations. Reconnaissance studies include aeromagnetic surveys, mapping of geological structure and lithology, and lake bottom sonar surveys to establish detailed surface and near-surface conditions. These are followed by deep drilling and hydrogeological studies to develop a knowledge of the underground structure.





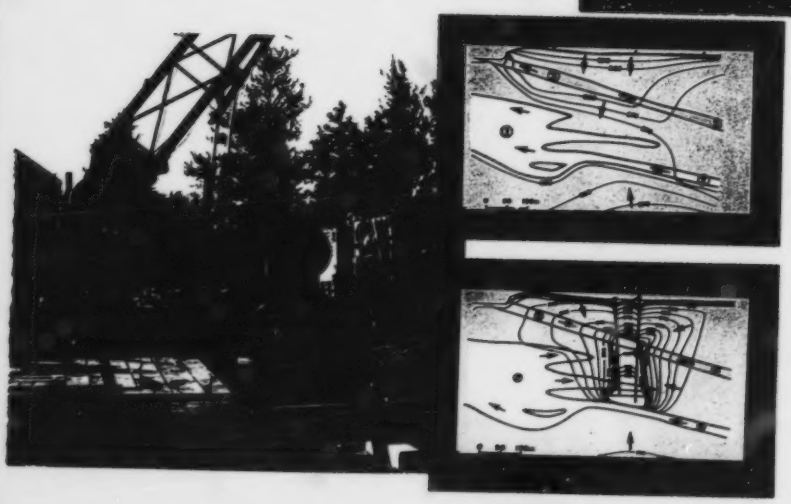
Schematic cross section showing fracture and topographic characteristics of curvilinear valleys.



Underground fractures in granite can be detected by radar from the surface. Such investigations provide information on the characteristics of the rock mass that could be considered for a disposal site. The orientation of the fracture zone is indicated by the dark areas of the radar plots and can be verified by drilling.

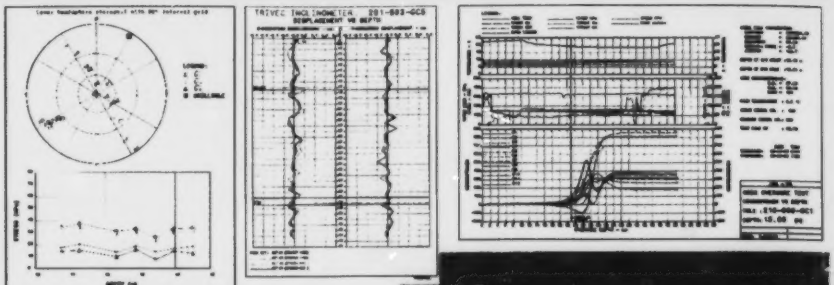
The URL is located in eastern Manitoba in previously undisturbed granite in the Canadian Shield.

A shaft has been sunk to 445 metres below the surface and experimental rooms have been built at the 240 metre level. The URL is being used to study the physical and chemical effects of excavation in granite and to demonstrate the technology necessary for safe disposal of used nuclear fuel.

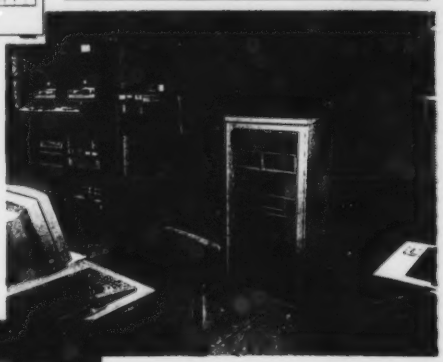


Hydrogeological testing and monitoring have been carried out to a depth of 1200 m in boreholes at selected research areas in the Canadian Shield. Groundwater conditions at the URL before shaft excavation (above) and after shaft sinking (below) show how groundwater flow in the rock is affected by excavation of the URL shafts.

This deep borehole deformation gauge allows scientists to measure the stress in rock at depths up to 1000 metres.



These plots show (a) the magnitudes and orientations of 7 consecutive overcoring stress measurements, (b) data from an overcore test, and (c) a record of how much the rock is displaced by excavation.



Data compiled during investigations at th URL are used to build a computer model representing the natural rock system. Information is finally used in a larger computer model to predict the long-term feasibility and safety of burying used nuclear fuel underground.

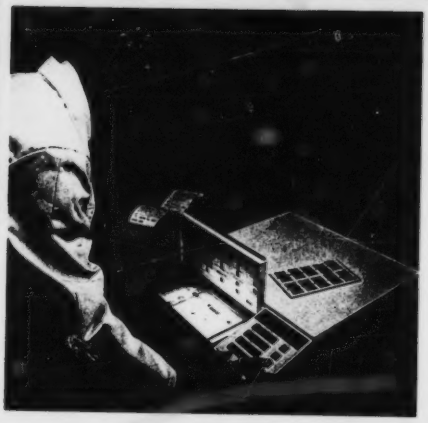
Excavation of the URL shafts through water bearing fracture zones has provided valuable information.

(Below) This device measures coupled hydraulic pressure and rock displacement at a fracture in a borehole to help scientists learn more about how rock and groundwater systems behave under stress.

(Above) Geochemical sampling of groundwater at the URL to determine its composition at depth.

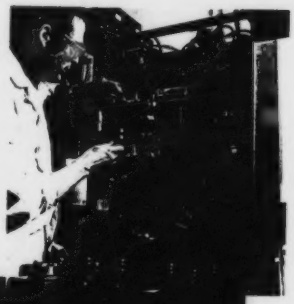
(Below) A continuously monitored triaxial strain cell is used in the URL to provide information on stresses in the rock.

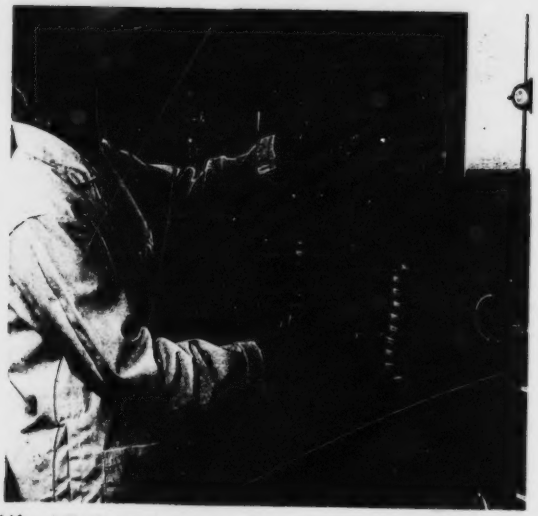
(Above) Radioactive material sorption studies conducted in a nitrogen atmosphere.



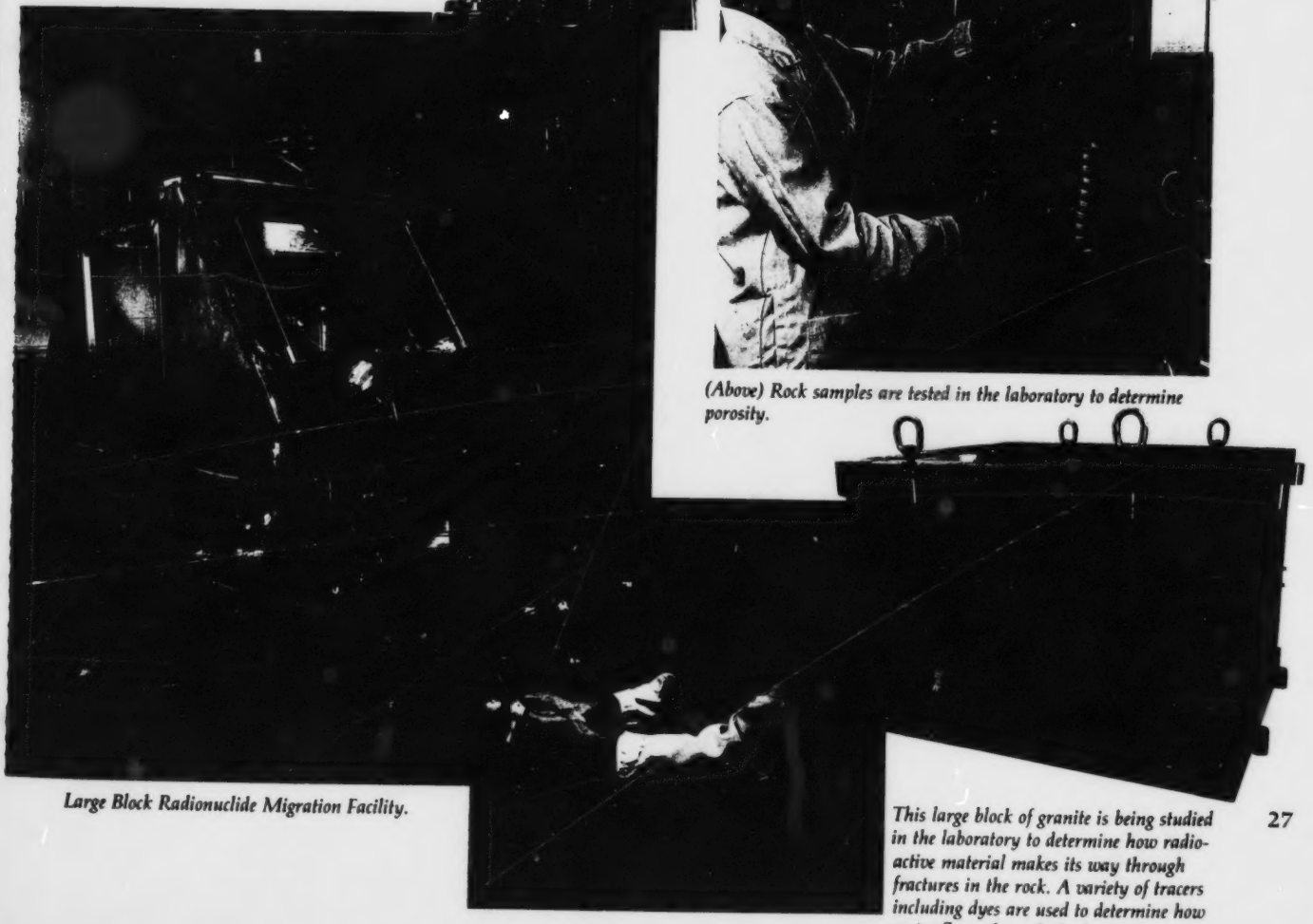
A laser densitometer and an integration recorder are used for measuring how much of any radioactive material that might escape from the buried used fuel would be sorbed onto the rock.

(Right) This state-of-the-art infrared spectrometer is used to help understand sorption of radioactive material on various minerals in the rock.





(Above) Rock samples are tested in the laboratory to determine porosity.



Large Block Radionuclide Migration Facility.

This large block of granite is being studied in the laboratory to determine how radioactive material makes its way through fractures in the rock. A variety of tracers including dyes are used to determine how water flows through the fracture.

Environmental Research

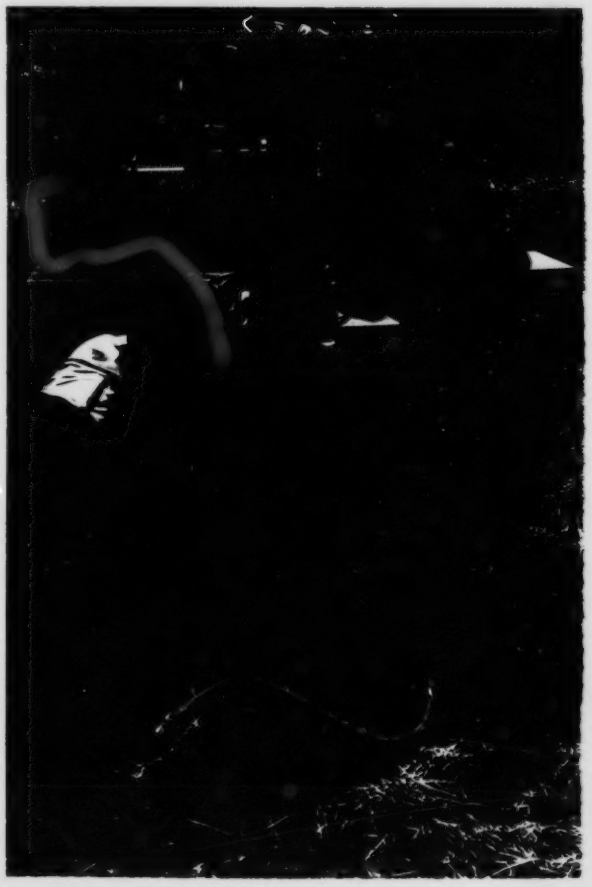
Environmental research has been carried out to develop an understanding of processes in the biosphere so that the migration of radioactive material in the surface environment can be understood. The research provides information for the design of models and computer codes to identify the environmental impact of a disposal facility.

The environmental research program has four major components: aquatic, terrestrial, atmospheric, and food chain pathways.

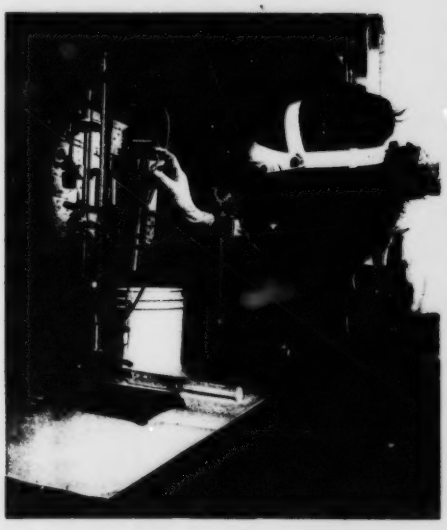
Aquatic research involves the study of the behavior of radioactive material entering surface waters from groundwater, and the subsequent partitioning of the radioactive materials between water and sediments. Terrestrial research includes studies of radionuclide behavior in forest, agricultural, and wetland soils. Atmospheric research concentrates on processes that could suspend, transport, and re-deposit radioactive materials locally and regionally. Research into food chains concentrates on the transfer of radioactive materials to plants, animals, and humans.

The data from these experiments has been used to construct a computer model of the movement of radioactive materials through food chains, including agricultural and natural components, to human populations. All of these investigations have been undertaken so that reliable estimates can be made of the impact of used fuel disposal on people and the environment.

This balloon and its attached radio transmitter give meteorologists data about atmospheric conditions. These data are used to develop and verify models that describe the suspension and transport of radionuclides in air and their redeposition elsewher



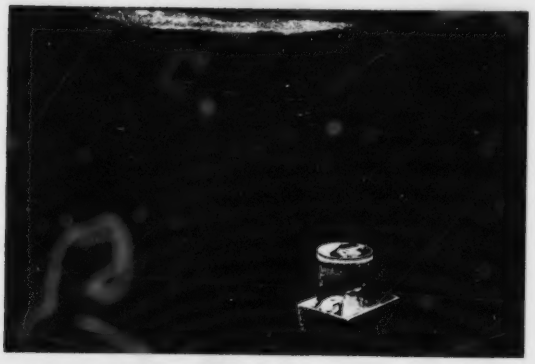
Soil cores are taken to study the transport of radioactive materials downward by leaching and upward by capillary action.



This apparatus is used to extract carbonates containing carbon-14 from soils used in an experiment studying carbon-14 uptake by plants.

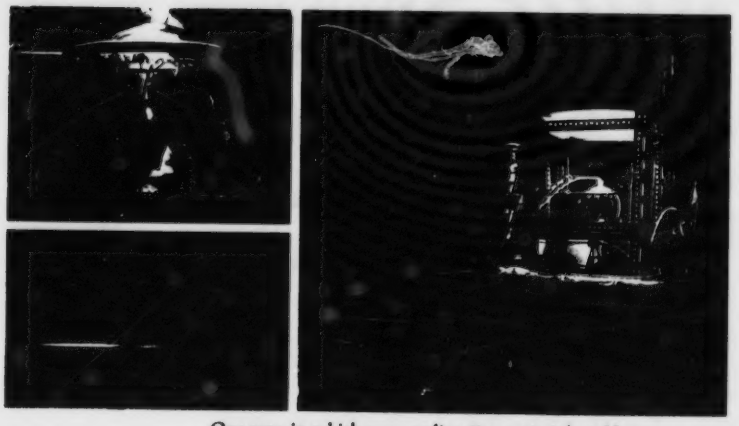
Since most deep groundwater discharges will be to water bodies, lakes are mapped so that their volumes are known for modeling purposes.

Peat cores are taken in a sphagnum bog to obtain soil distribution coefficients for iodine to determine how radionuclides could be dispersed in organic deposits.



Water is collected from a saline spring to analyze for dissolved gases. Since deep groundwater in the Canadian Shield typically contains high concentrations of helium, deep groundwater discharge points can be located by their helium content.

This experiment examines plant uptake of radionuclides from contaminated groundwater.



One way in which some radioactive material could move is by plant uptake and emission to the atmosphere. This experiment is studying radioactive iodine transport through bean plant leaves.

Disposal Facility Engineering

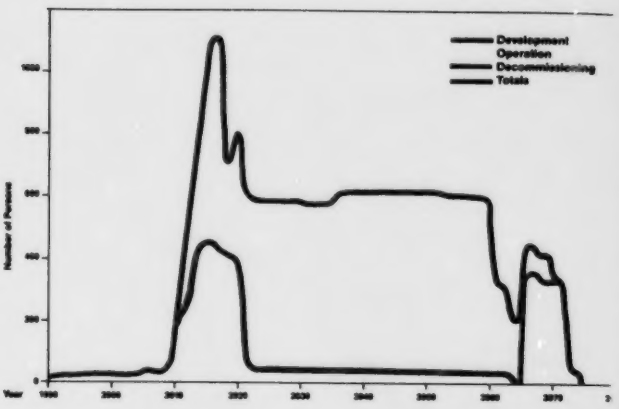
Extensive engineering studies have determined that the fundamental concept of building and operating a used nuclear fuel disposal vault is feasible and can be developed with present-day technology.

A conceptual engineering study has been conducted to examine how a disposal vault could be built and operated and to develop an understanding of the time required, the costs, and the manpower that would be involved. Continuing studies will refine the details of the design such as the relative merits of various alternative excavation techniques, container materials and emplacement methods, and methods for sealing the vault.

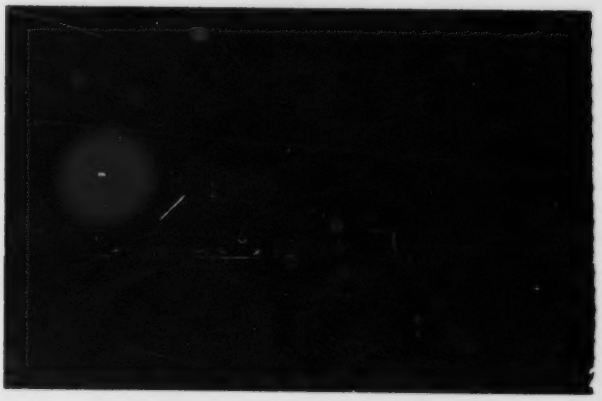
A complete disposal facility consists of a fuel receiving area, an immobilization facility for packing the fuel in durable containers, and an underground vault consisting of shafts, tunnels, and disposal rooms. The packaged used nuclear fuel would be handled in shielded facilities and transported in shielded casks to protect the workers from radiation. Once the containers are emplaced in the disposal rooms, the rock and sealing material would provide adequate shielding.

The design, construction, operation, closure, and decommissioning of a disposal vault would be a large industrial project. The total project cost would be about $ billion, spread over about a 70-year period, for 191 000 tonnes of used fuel, the amount expected to be produced in Canada by 2035. This estimate could change based on the amount actually produced and the actual construction schedule. At this time the provincial utilities are collecting funds for disposal. The cost for disposal is estimated to equal less than 1 percent of domestic electricity costs to the consumer.

During the 10-year construction phase, a work force of about 1,100 would be needed. During the 40 years that the waste is emplaced in the vault, about 600 full-time employees would be required. Prior to and during the development and operation, monitoring instruments and equipment would be installed in and around the disposal vault. These instruments would provide data for the safe operation and for monitoring the performance of the disposal vault over a period of time. This information could be collected and assessed for as long as necessary.



The design, construction, operation, and closure of the disposal facility will result in a large number of employment opportunities. At its peak, over 1,100 will be employed at the site. The 40-year operational phase will require about 600 full-time employees.

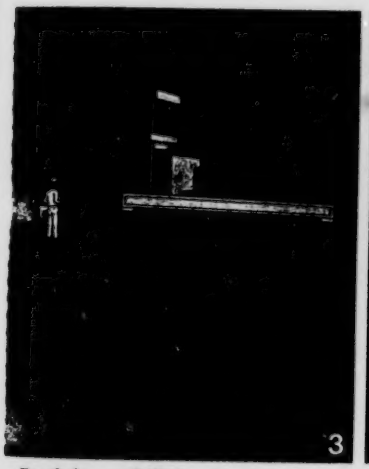


The shielded transport cask is rotated and secured in an inclined position on the transport truck for improved stability and decreased clearance height. The container is brought to the entrance of the emplacement room where it is transferred to the awaiting container emplacement platform.

6 After all the available emplacement holes are filled with buffer and waste containers, the first phase of room backfilling begins. Specially modified, low-profile underground vehicles perform essentially the same process as for highway construction. Specially prepared backfill (25 wt. percent lake clay and 75 wt. percent crushed granite, moisture content about 9 percent) is brought to the room in mix trucks. It is distributed in the rooms with front-end loaders, leveled with bulldozers, and compacted in layers with rollers. This work is complete when the backfill reaches within 2 metres of the room's roof.

The Canadian concept for permanent used nuclear fuel disposal is to bury the suitably packaged waste 500 to 1000 metres deep in stable rock in the Canadian Shield. This is an artist's conception of the proposed facility. A network of underground tunnels and disposal rooms about 2 kilometres square will hold 191 000 tonnes of used fuel.

The shielded transport cask containing the used fuel containers is transferred from the waste transport shaft cage to an awaiting transport truck.



Boreholes are drilled in the floors of the emplacement rooms in preparation for emplacement of sealing material and containers.

A hole is bored in the pre-compacted clay/sand sealing material to provide a place for the container. The container is lowered from the shielded transport cask into the hole.

Dry silica sand is used to fill the spaces between the sealing material and the container before the top layer of sealing material is added. At this time the container is shielded and personnel could walk in the room.

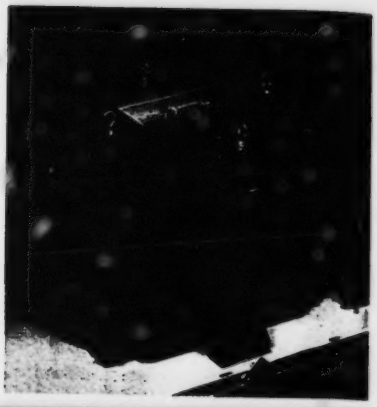
7 The upper backfill has the same composition and thus the same swelling properties as the borehole sealing material. Because of height restrictions in the emplacement room it must be sprayed in place. When this backfilling is completed the room is sealed with a massive concrete bulkhead which is contact grouted to the rock. At this time the contents of the room are adequately safeguarded. If there is a need to retrieve the containers, the bulkheads and backfill could be removed and containers would be handled by specially designed equipment.

Transportation

Used nuclear fuel will be transported from storage sites at the generating stations to a future disposal site in special transport casks designed to withstand severe accidents. Thick metal barriers shield the drivers and other people from the radiation.

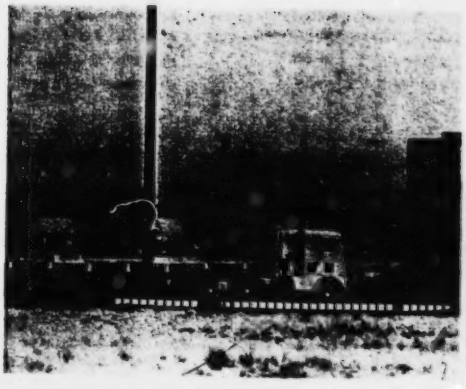
Canada's regulations for such casks are based on standards developed by the International Atomic Energy Agency. Casks built to these standards are already in use around the world, and there has never been an accident resulting in radiological injury to a member of the public. In Britain and the United States, such casks have been tested in real crashes involving trucks and trains at speeds in excess of 120 km/h. Although the train locomotives were destroyed, the ability of the casks to contain their cargoes was not compromised.

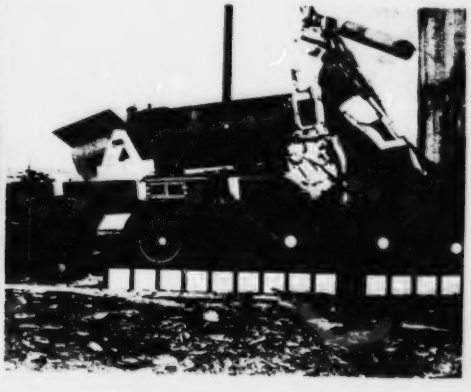
It is recognized that the drivers of the transport vehicles could be injured as a result of ordinary traffic accidents. Based on accident statistics for the transport of other materials, this risk is estimated to be between 0.1 and 0.8 fatalities per year during full operation, depending on the mode of transportation used and the distance to the disposal facility.

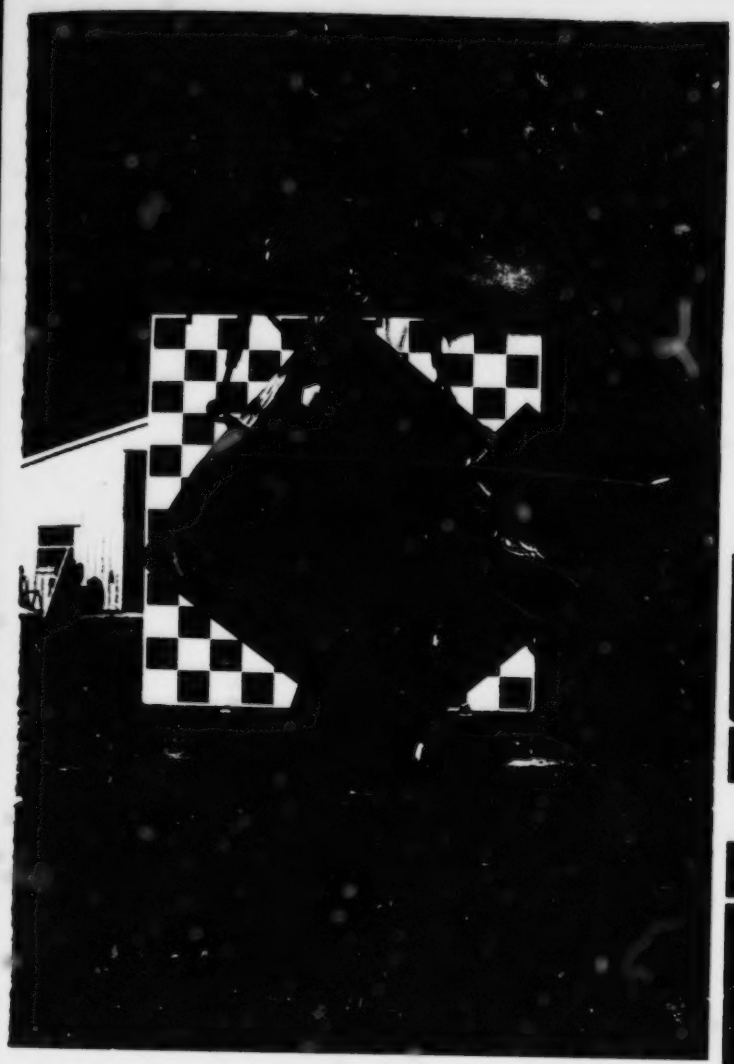


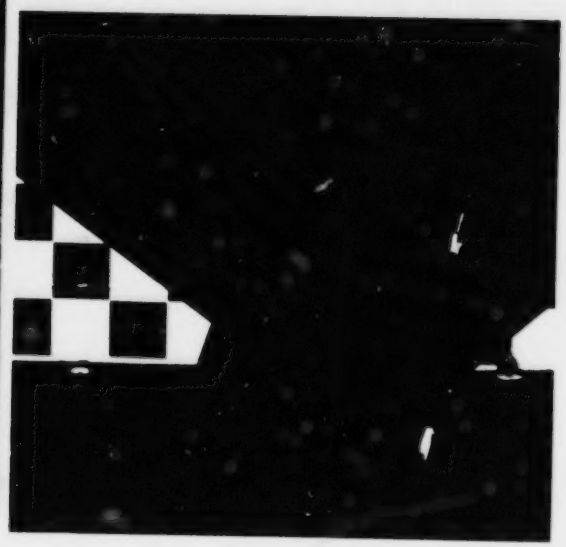
A special transport cask has been designed and built by Ontario Hydro. Before it was licensed it underwent a series of tests to make sure it could withstand severe accident conditions.

Transport casks in use now are designed to survive severe accidents. In the photographs at right tests conducted at Sandia National Laboratories in the United States show an intact cask (far right) that has been involved in a locomotive crash. The two photographs at the immediate right show a cask crashed into a concrete wall without being ruptured.

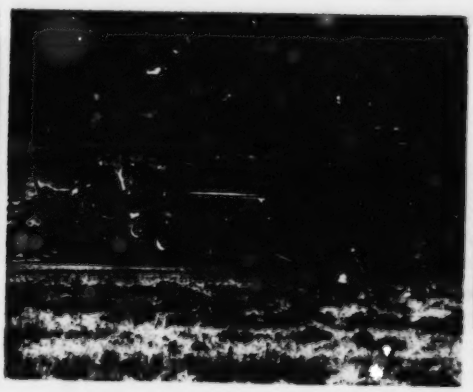


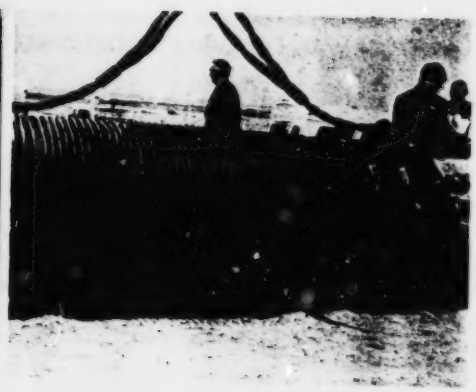






This half-scale model of the used fuel transportation cask has been subjected to a battery of grueling tests including being dropped 9 metres onto a hard surface, exposure to an 800°C petroleum fire for 30 minutes, and immersion in water for 8 hours. As a result of this evidence, Atomic Energy Control Board has approved the cask for use on Canadian roads.





Environmental and Safety Assessments

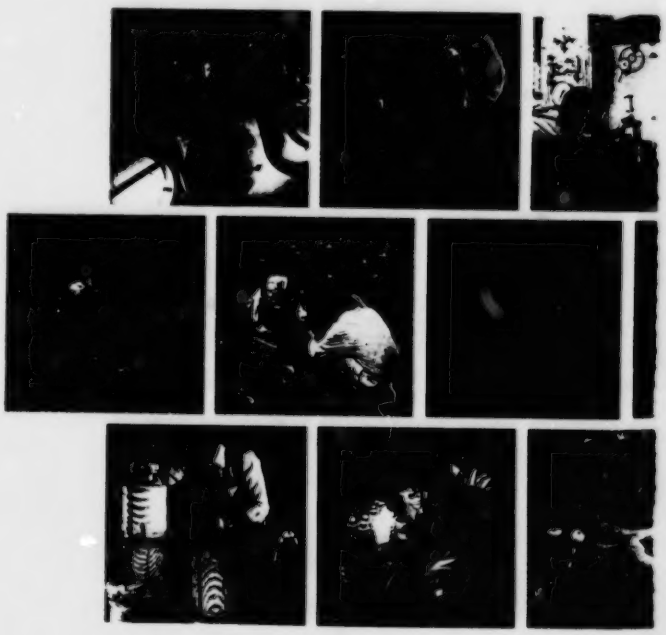
A major objective of the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program is to evaluate the potential impacts of the transportation, storage, immobilization, and disposal of used nuclear fuel on people and the environment. Transportation and storage are licensed technologies in Canada. Two interim assessments that tested the methodology and evaluated the possible effects of a disposal vault have been made. The assessments were given to the regulatory agencies and made available for public comment in 1981 and 1985. Comments received on the first interim assessment were collected and documented. Comments from regulatory and environmental agencies on the second assessment were coordinated by the Atomic Energy Control Board (AECB). The comments received have been taken into account in developing the final generic assessment that is currently being completed. These interim assessments indicated that there should be no significant releases of radioactive material from a disposal vault constructed deep within the granite terrain of the Canadian Shield. Radiation doses to exposed individuals were estimated to be a small fraction of those received from natural background radiation. The health risks of a properly designed disposal facility should be well within the regulatory objectives and guidelines proposed by the AECB.

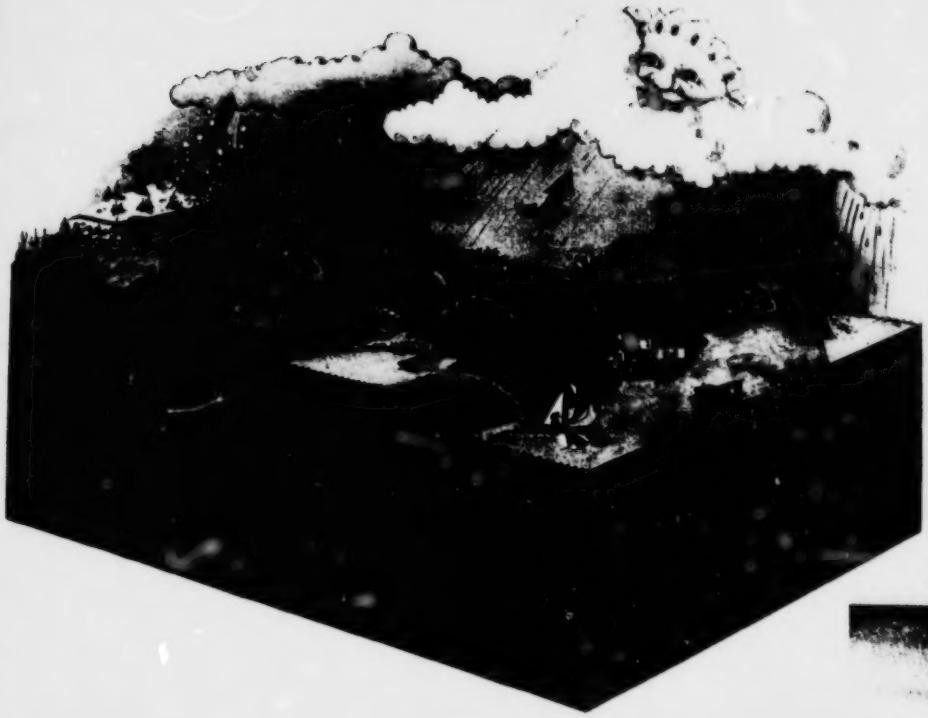
The method for estimating the environmental, economic, and social impacts of the construction and operation of nuclear facilities is well established. It is being applied to the assessment of a used nuclear fuel disposal facility during its pre-closure phase. Factors that need to be considered include the use of natural resources, nuclear safeguards and security, occupational and public safety, the pathways taken by the small amount of radioactive materials released during operation, and the effect of these on the environment. The impacts of transporting the used fuel to the disposal site, the construction of the vault, the operation of the immobilization and disposal facilities, and the sealing of the disposal vault have been estimated.

The operation of any nuclear facility may result in some emissions to the environment. The conceptual disposal facility has been designed to meet all present regulations concerning both radiological and non-radiological environmental impacts. The design, construction, operation, closure, and decommissioning of any actual used nuclear fuel disposal vault would have to take into account the environmental regulations in place when licence applications are submitted.

After the vault is sealed, the eventual corrosion of fuel containers and the dissolution of small amounts of radioactive materials that could be transported to the surface would take thousands of years. It is not possible to physically demonstrate how effectively a disposal system would work over such a long time period. However its long-term safety has been evaluated by studying the behavior of the fuel, containers, sealing materials, rock mass, and surface environment. The evaluations are based on a thorough understanding of the underlying physical, chemical, geological, and radiological processes of disposal and have been tested against integrated laboratory and field experiments.

The post-closure assessment takes into account a wide range of features, events, and processes that could affect the disposal system far into the future. Mathematical models and computer simulations are used to evaluate the range of possible long-term impacts, determine how uncertainties in knowledge and data affect these impacts, and estimate how the impacts may vary over time. The result is an estimate of the possible effects on an individual at some future time.

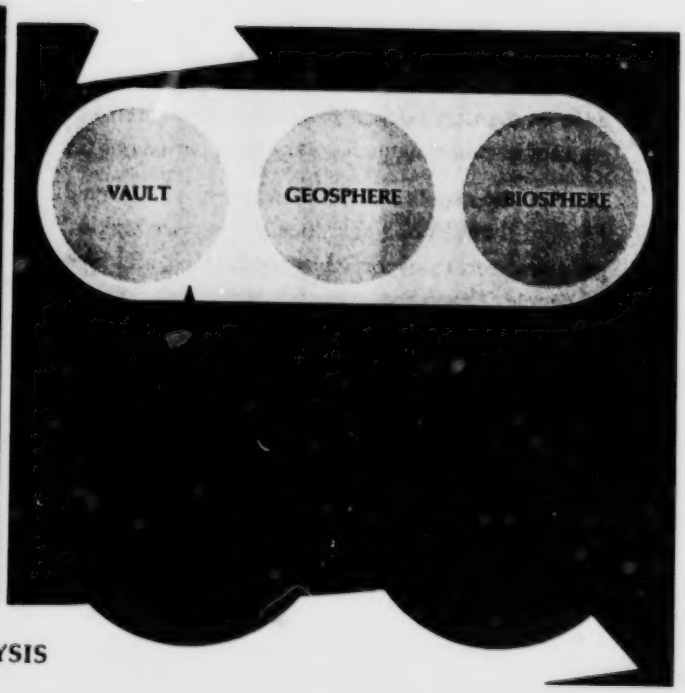




Water circulates in nature in a closed cycle of condensation, flow, and evaporation. Groundwater is formed by rainfall and melted snow that flows down into the soil and rock to the water table. Groundwater within bedrock seeps through fractures and discharges at the surface at areas of low topography such as lakes and rivers. Minute particles of radioactive material that would eventually be dissolved in groundwater would make their way to surface waters, sediments, and soils and thereby be transferred through the food chain to plants, animals, and man.

Information gained from engineering studies and research carried out on waste forms, containers, backfill, vault seals, host rock, groundwater, and environmental pathways is assimilated and used in assessments of safety and environmental impacts of the disposal system.

MODELS AND DATA



SENSITIVITY ANALYSIS

Learning From Nature

Assessing the safety of a used nuclear fuel disposal vault requires predicting how all of the components of the disposal system will behave far into the future. This requires an understanding of the fundamental physical and chemical processes that affect its performance.

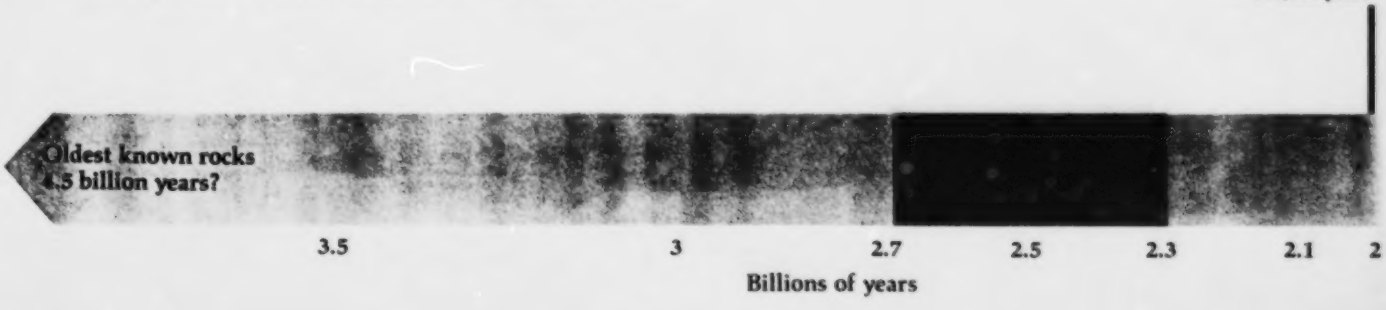
Controlled experiments have been conducted in laboratories and at geological field research areas to develop an understanding of these processes. Of course, experiments can be done for only a short time compared to the length of time the disposal system must function. Studies of natural examples of the preservation of materials for thousands or millions of years can add confidence to the assessment of how a disposal vault would behave in the long term.

The understanding of the factors that lead to the immobilization of radioactive materials in geological systems can be supported by studying natural radioactive ore bodies. A high-grade uranium oxide ore deposit at Cigar Lake in northern Saskatchewan has been of particular interest.

About 98 percent of used nuclear fuel is uranium oxide, the most common uranium mineral in nature. Most waste products in used fuel are bound up in the structure of this uranium and cannot escape if the uranium does not dissolve. A study of the Cigar Lake ore body has disclosed uranium crystals that have not dissolved since they were formed about 1,300 million years ago. The chemical composition of the ore and of the underground water today is consistent with the understanding gained in the laboratory of the conditions needed to prevent the uranium from dissolving and moving away. The study of the Cigar Lake ore deposit gives confidence that geological systems can contain uranium oxide for very long periods of time.

Used nuclear fuel contains plutonium, a long-lived element that can be hazardous if it is dissolved in groundwater, transported to the surface, and ingested by people. Therefore, there has been considerable scientific interest in another uranium ore deposit at Oklo, in Gabon, West Africa. There, a present-day open pit uranium mine shows the remains of six natural nuclear

Two billion years ago at Oklo in West Africa a natural reactor operated underground in a uranium deposit. The radioactive plutonium produced did not move from its point of origin. This phenomenon adds to scientists' confidence that underground disposal of used fuel in stable rock formations can be made safe.

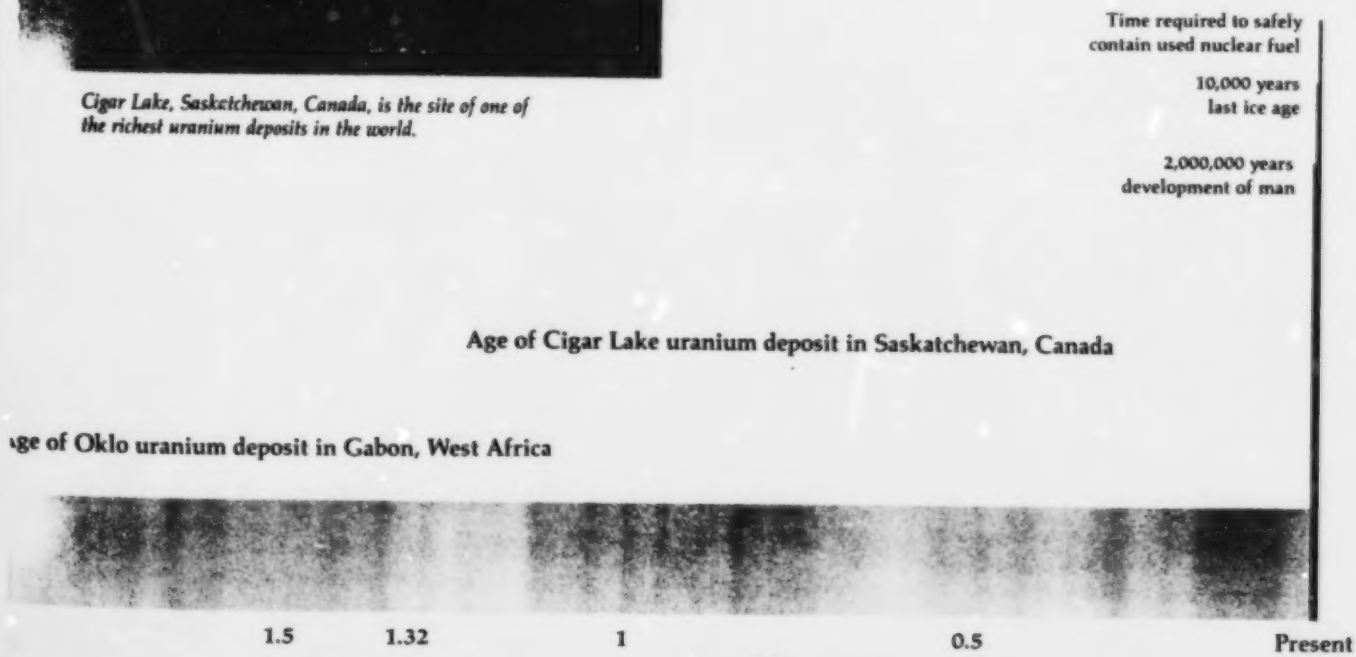


reactors that operated about 2,000 million years ago. These natural reactors created the same kinds of by-products that are produced by man-made reactors today, including plutonium. A study of how these products are now distributed in the uranium deposit has provided useful information on how far they can be expected to move over millions of years. Examination of the ore shows that the plutonium atoms never moved from the grains of uranium ore in which they were formed. The study of these ancient reactors at Oklo, which had no special waste management precautions, gives confidence that the plutonium in used nuclear fuel can be contained by geological systems until it is no longer hazardous.

The Canadian disposal concept proposes that bentonite clay be packed around the waste containers because bentonite swells when it comes into contact with water and provides an effective seal. However, the disposal containers will be hot (up to 100 degrees C), there will be high pressures in a disposal vault, and salty water may be present. Some natural clays, such as those near volcanoes or deep in the earth's crust, have been exposed to similar conditions. Studies of two such deposits, one in Sardinia underlying volcanic rock and the other in Sweden buried more than 1000 metres below the island of Gotland, have shown that, as expected, the clays have changed. However, even after millions of years they still swell and retain their sealing properties. Studies of Canadian clays have shown that even if the clay cracks as a result of drying out, it should still swell and re-seal itself when it comes into contact with water.

In both Oklo and Cigar Lake the clay surrounding the uranium deposit acts to keep most of the uranium in place even though groundwater is present in the deposit. The iron in the clay reacts with the groundwater to make it oxygen deficient and the uranium will not dissolve in oxygen-deficient water.

Cigar Lake, Saskatchewan, Canada, is the site of one of the richest uranium deposits in the world.



Provisions for Review and Public Hearings

The used nuclear fuel disposal concept has undergone thorough scrutiny and review throughout its development. It will undergo further review before decisions are made about its acceptability. AECL's role is to develop the concept and act as its proponent in the review process that will take place over the next several years.

External Reviews

Research on disposal technology has progressed to the point where the technical case for the disposal concept is being prepared for review. Since the research began, more than a thousand scientific background documents have been prepared and are available to the public. More than 300 technical papers have been published in refereed journals. Two interim assessments of the concept have been published and reviewed, and the final assessment will be submitted to the public and to the review agencies when completed.

Technical Advisory Committee (TAC)

TAC, established in 1979, provides an ongoing independent scientific review of the program. The Committee advises AECL on the extent and quality of the program and offers recommendations regarding future research plans. The membership of this independent Committee consists of some of Canada's foremost scientists, nominated by professional societies throughout Canada.

Since 1979, TAC has issued an annual public report giving the Committee's comments and recommendations on the program.

Social Issues

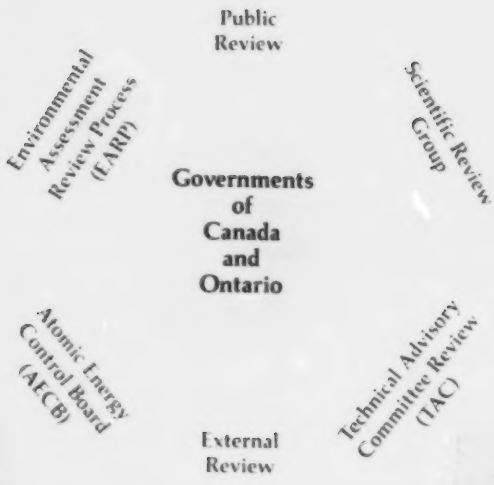
Some of the issues related to used nuclear fuel management cannot be resolved by science or by technical means. These social, moral, and ethical issues are concerned with how people relate to one another and how we live together as a society. The question of used nuclear fuel management has been known to strain mechanisms that have traditionally been used for resolving differences of opinion among various sectors of society.

As part of the Nuclear Fuel Waste Management Program, AECL has conducted public opinion research

1989
Environmental Assessment Panel formed and scope of the review defined. Scientific Review Group appointed.

1990
Environmental Impact Statement prepared by AECL.

Timetable for the Review



1991
Environmental Impact Statement made publicly available and submitted for review.

1991
Disposal concept reviewed from a technical perspective by the Scientific Review Group. Report made to the Environmental Assessment Panel.

1992
Disposal concept reviewed and public hearings conducted by the Environmental Assessment Panel. Report made to the Minister of Environment and the Minister of Energy, Mines and Resources.

1993
Decision by the governments of Canada and Ontario on the acceptability or non-acceptability of the disposal concept and on next steps.

and held discussions with special and public interest groups to determine what these issues are and how society feels they should be dealt with. An opportunity will also exist during the public hearing phase of the review for members of the public to provide input to used fuel management decisions by governments.

Role of the AECB

Nuclear energy in Canada is regulated by the Atomic Energy Control Board, an agency of the federal government. The AECB licenses sites where radioactive wastes are stored, and has published regulatory guidelines for disposal. The basic requirement of these guidelines is that the burden on future generations from radioactive wastes will be minimized by

- selecting disposal options for radioactive wastes which, to the extent that this can reasonably be achieved, do not rely on long-term institutional controls as a necessary safety feature;
- implementing these disposal options at an appropriate time — technical, social, and economic factors being taken into account;
- ensuring that there are no predicted future risks to human health and the environment that would not be currently accepted; and
- ensuring that the predicted radiological risk to individuals from a waste disposal facility does not exceed one in a million serious health effects in a year. This translates into a maximum individual dose of 0.05 mSv per year.

An AECB licence will be required before any used fuel disposal facility can be built or operated. The AECB is expected to participate in the review of the disposal concept by the Environmental Assessment Panel.

Environmental Assessment and Review Process (EARP)

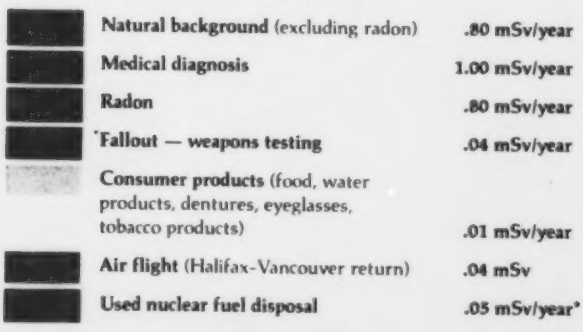
The disposal concept developed by AECL has been referred to the federal Minister of Environment for review by an Environmental Assessment Panel under the Environmental Assessment and Review Process. The Panel will be assisted by a Scientific Review Group that will examine the technical aspects of the disposal concept.

The Panel's review will be broad and will examine a range of issues relating to the long-term management of used nuclear fuel. This will include different geological media and the plans and programs of other countries, including their plans and schedules for the siting and construction of radioactive waste management facilities.

The Panel is expected to address topics such as:

- the appropriate criteria by which the safety and acceptability of a concept for long-term management of used fuel should be evaluated;
- the general criteria for the management of used nuclear fuel, as compared to those for wastes from other energy and industrial sources;
- approaches to long-term fuel management, including long-term storage with a capability for continuing human intervention in the form of monitoring, retrieval, and remedial action; and the transition from storage to permanent, passive disposal;
- the degree to which we should relieve future generations of the burden of looking after the fuel;
- the social, economic, and environmental implications of the Canadian concept for used nuclear fuel disposal;

Average radiation doses



** This is the AECB regulatory guideline for the average annual dose received by an individual living at the discharge point from a used nuclear fuel disposal vault in the most exposed group in the distant future. This dose is a small fraction of the average annual exposure received from natural and man-made sources of ionizing radiation as represented in the adjacent pie chart.*

- the use of different geological media and the experience of other countries in addressing their own used nuclear fuel management issues;
- the impact of recycling or other processes on the volume of the waste;
- a recommended process and criteria for siting an eventual long-term used fuel management facility; and
- the next steps to be taken with respect to the management of used nuclear fuel in Canada.

Because the issues being examined are complex, and because it takes time to obtain the necessary public, regulatory, and scientific input, the review will take place over several years.

The Panel is expected to hold public hearings in Ontario, Quebec, and New Brunswick, the provinces that have nuclear power reactors. Interested persons and organizations will be able to participate in the review process and make representations.

Provincial and federal government departments of environment and energy, as well as other departments and regulatory agencies such as the AECB, are expected to participate in the review process to ensure that the disposal concept that has been developed meets the requirements of their respective laws and regulations.

Government Decision-making Process

After they receive the report from the review panel, the governments of Canada and Ontario will decide whether the concept of used nuclear fuel disposal is acceptable. If it is unacceptable, the governments could decide to commission further research and development work or to examine different options developed by other countries. If it is acceptable, the governments could decide on the timing of the next phases of the disposal program, including the construction of a disposal facility.

Options for the Future

If the disposal concept is found to be acceptable it would take at least ten years to select a site for a disposal facility, perform the necessary geological research on the site, and conduct further environmental review and licensing processes specific to the site.

No decision has yet been made on whether to initiate such a process immediately after completion of the review of the concept.

There is no technical urgency to begin disposal. The used nuclear fuel is in safe temporary storage systems that can continue to be used for many decades. To delay disposal would mean that the money already collected for this purpose could continue to be used now for other purposes and that the used fuel would be available for recycling, should this become economically viable in the future.

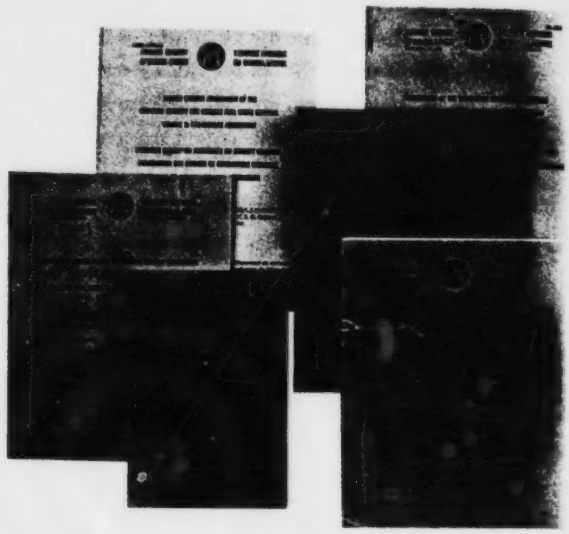
However, there are some risks in delaying disposal. The technical team that is now assembled would disperse and some of the research might have to be repeated. Future generations may not want to commit the funds for disposal, and the problem might be handed down from generation to generation.

Other waste management options include surface or underground storage at a site that could later be used for disposal (so that the waste would be moved only once) or a gradual start on disposal that does not require a large commitment of resources.

Decisions on what actions will follow the acceptance of the disposal concept will be made by governments, electrical utilities, and other agencies that have an environmental or regulatory interest in radioactive waste management.

List of Publications

This is a selected list of publications about nuclear waste management research. Any publication by Atomic Energy of Canada Limited is available upon request.



"A Race Against Time — Interim Report on Nuclear Power in Ontario," The Royal Commission on Electric Power Planning, A. Porter, (Chairman). Queen's Printer for Ontario. Report No. ISBN 0-7743-2890-8 (1978).

"An Electrochemical Investigation of Localized Corrosion on Titanium in Chloride Environments," P. McKay and D. B. Mitton. *Corrosion*, Vol. 52, p 41 (1985).

"Buffer and Backfilling Systems for a Nuclear Fuel Waste Disposal Vault," W. L. Wardrop and Associates Ltd., Canadian Mine Services Ltd., and Hardy Associates Ltd. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-341 (1985).

"Design on Multicomponent Systems Tests on High-Level Nuclear Waste Forms," R. B. Heimann and L. H. Johnson. *Advances in Ceramics*, Vol. 8, p 337 (1984).

"Deep Geological Disposal of Nuclear Fuel Waste: Background Information and Regulatory Requirements Regarding the Concept Assessment Phase," Atomic Energy Control Board. Regulatory Policy Document R-71 (1985).

"Effect of Localized Waste-Container Failure on Radionuclide Transport from an Underground Nuclear Waste Vault," S. C. H. Cheung and T. Chan. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-7796 (1983).

"Engineered Barrier Research in Canada," K. Nuttall, J. A. Chadha, and T. J. Carmichael. Proceedings of IAEA Conference on Siting, Design, and Construction of Underground Repositories for Radioactive Waste, Hannover, FRG, March 1986, Paper No. IAEA-SM/21; also Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-9243 (1986).

"Environmental and Safety Assessment Studies for Nuclear Fuel Waste Management. Volume 1: Background," R. B. Lyon, K. K. Mehta, and T. Andres. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-127-1 (1981).

"Environmental and Safety Assessment Studies for Nuclear Fuel Waste Management. Volume 2: Pre-Closure Assessment," K. Johansen, J. R. E. Harger, and R. A. James. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-127-2 (1981).

"Environmental and Safety Assessment Studies for Nuclear Fuel Waste Management. Volume 3: Post-Closure Assessment," D. M. Wuschke, K. K. Mehta, K. W. Dormuth, J. A. K. Reid, and R. B. Lyon. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-127-3 (1981).

"Geological Considerations in Siting a Repository for Underground Disposal of High-Level Radioactive Waste," Atomic Energy Control Board. Regulatory Document R-72 (1987).

"High-level Radioactive Waste Management in Canada: The Eleventh-Hour Report of the Parliamentary Standing Committee on Environment and Forestry," R. Brisco, M.P. (Chairman). (Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario 1988).

"Joint Statement 1978 June 5," Minister of Energy, Mines and Resources Canada and the Ontario Energy Minister. (Printing and Publishing Supply and Services Canada, Ottawa, Canada K1A 0S9).

"Joint Statement 1981 August 4," Minister of Energy, Mines and Resources Canada and the Ontario Energy Minister. (Printing and Publishing Supply and Services Canada, Ottawa, Canada K1A 0S9).

"Leaching Studies of Sphene-Based Glass-Ceramics," P. J. Hayward, W. E. Hocking, S. L. Mitchell, and M. S. Stanchell. *Nuclear and Chemical Waste Management*, Vol. 5, p 27 (1984).

"Long-Term Radiation Protection Objectives for Radioactive Waste Disposal," OECD. Report No. ISBN: 92-64-12604-X, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France (1984).

"Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and Reprocessing Wastes," Uranium Institute London, England (1983).

"Ninth Annual Report of the Technical Advisory Committee on the Nuclear Fuel Waste Management Program," L. W. Shemilt (Chairman). Atomic Energy of Canada Limited Report, TAC-9 (1988). Available from Dr. L. W. Shemilt, McMaster University, Hamilton, Ontario L8S 4L7.

"Nuclear Energy — Unmasking the Mystery — Tenth Report of the Parliamentary Committee on Energy, Mines and Resources," B. Sparrow, M.P. (Chairperson). (Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada, Ottawa, Ontario, 1988).

"Nuclear Fuel Waste Management Concept: Preliminary Safety Assessment of the Pre-Closure Phase," J. S. Nathwani. Ontario Hydro Report No. 82175, Rev. 1, Nuclear Studies and Safety Department, Ontario Hydro, Toronto (1983).

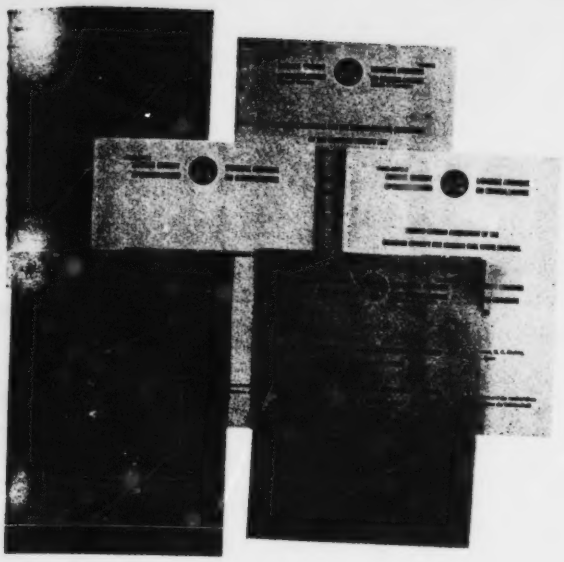
"Performance Assessment for Nuclear Fuel Waste Disposal — The Canadian Approach," E. L. J. Rosinger, B. W. Goodwin, and D. M. Wuschke. Proceedings of "Waste Management '85," Tucson, Arizona, March 1985.

"Predictions of Hydrogeological Perturbations Due to Construction of the Underground Research Laboratory," V. Guvanasen, J. A. K. Reid, and B. W. Nakka. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-344 (1985).

"Public Consultation in the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program," R. S. Dixon, R. B. Anderson, M. A. Greber, and J. A. Hillier. Proceedings of the Symposium on Waste Management, Tucson, Arizona, March 1987.

"Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle," K. W. Dormuth (Guest Editor). Special Issue: *Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program*, Vol. 8, No. 2-3. (Harwood Academic Publishers GmbH USA, 1978).

"Radioactive Waste Management in Canada," W. T. Hancox, H. N. Isaac, and J. Howieson. Proceedings of IAEA Conference on Siting, Design, and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes, Hannover, FRG, March 1986, Paper No. IAEA-SM/2; also Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-9242 (1986).



"Radioactive Waste Management Policy and Its Implementation in Canada," T. E. Rummery, D. Lisle, J. Howieson, and D. H. Charlesworth. Proceedings of IAEA Conference on Radioactive Waste, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/165, Vol. 1, p 175; also Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-8033 (1983).

"Regulatory Objectives and Guidelines for the Disposal of Radioactive Wastes," Atomic Energy Control Board. Regulatory Policy Document R-104 (1987).

"Report of the Royal Commission on Electric Power Planning," A. Porter, (Chairman). Queen's Printer for Ontario. Report No. ISBN 0-7743-4663-9 (1980).

"Research and Development for a Plutonic Rock Radioactive Waste Disposal Vault," K. W. Dormuth and J. S. Scott. Proceedings of the IAEA International Conference on Radioactive Waste Management, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/166, p 291; also Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-7961 (1983).

"Second Interim Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal. Volume 1: Summary," P. A. Gillespie, K. Harvey, and D. E. Main. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-8373-1 (1985).

"Second Interim Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal. Volume 2: Background," P. A. Gillespie, D. M. Wuschke, V. M. Guvanasen, K. K. Mehta, D. B. McConnell, J. A. Tamm, R. B. Lyon. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-8373-2 (1985).

"Second Interim Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal. Volume 3: Pre-Closure Assessment," K. Johansen, W. E. Dunford, K. J. Donnelly, J. H. Gee, B. J. Green, J. S. Nathwani, A. M. Quinn, B. G. Rogers, M. A. Stevenson, and J. A. Tamm. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-8373-3 (1985).

"Second Interim Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Waste Disposal Volume 4: Post-closure Assessment," D. M. Wuschke, P. A. Gillespie, K. K. Mehta, W. F. Heinrich, D. M. Le Neven, V. M. Guranasen, O. R. Sherman, D. C. Donahue, B. W. Goodwin, T. H. Andres, R. B. Lyon, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL 8374-4 (1985).

"Selection of Groups to Participate in the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Public Consultation Program," Pat Delbridge Associates Inc. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-333 (1985).

"Semi-Annual Status Report of the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program: April 1 - September 30, 1986," compiled by E. D. Wright. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-425-4 (1988).

"Social and Political Aspects of Nuclear Fuel Waste Management," E. R. Frech. Proceedings of the Canadian Nuclear Association Annual Conference, Toronto, Ontario, June 1985.

"Standards for the Development of Scientific Research Software," K. J. Hoffman and G. R. Sherman. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-291 (1985).

"SYVAC — A Computer Program for Assessment of Nuclear Fuel Waste Management Systems, Incorporating Parameter Variability," K. W. Dormuth and G. R. Sherman. Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-6814 (1981).

"The Canadian Approach to Site Characterization for a Nuclear Fuel Waste Disposal Vault," S. H. Whitaker, C. C. Davison, K. W. Dormuth, and J. C. Scott. Proceedings of IAEA Conference on Siting, Design, and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes, Hannover, FRG, March 1986, Paper No. IAEA-SM-289/33; also Atomic Energy of Canada Report, AECL-9245.

"The Canadian Container Development Program for Fuel Isolation," K. Nuttall, J. L. Crosthwaite, P. McKay, P. M. Mathew, B. P. M. Teper, P. Y. Y. Maak, and M. D. C. Moles. Proceedings of the Materials Research Society Symposium, Vol. 15, p 677 (1983).

"The Canadian Underground Research Laboratory," G. R. Simmons, A. Brown, C. C. Davison, G. L. Rigby. Proceedings of IAEA International Conference on Radioactive Waste Management, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/167, p 291; also Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-7961 (1983).

"The Management of Canada's Nuclear Fuel Wastes," A. M. Aikin, J. M. Harrison, and F. K. Hare (Chairman). Report of a study prepared under contract for the Minister of Energy, Mines and Resources Canada, August 1977. Energy Policy Sector, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Ontario. Report EP 77-1.

"Twenty Years' Experience in Canada with Wet and Dry Storage and Irradiated CANDU Fuel," J. A. Remington, R. C. Oberth, C. E. L. Hunt. Proceedings of the IAEA International Conference on Radioactive Waste Management, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/429, Vol. 3, p 107; also Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-8032 (1983).

"Used Fuel Storage and Transportation," R. A. McEachran. Proceedings of the 20th Information Meeting of the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, 1985, Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-375 (1986).

"Waste Immobilization Research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program," G. G. Strathdee and A. G. Wikjord. Atomic Energy of Canada Limited Technical Record*, TR-148 (1982).

"Whiteshell Nuclear Research Establishment Immobilized Fuel Test Facility," M. A. Ryz. *Transcript American Nuclear Society*, Vol. 44, p 590 (1983).

*Technical records are unrestricted reports available from SDDO, Atomic Energy of Canada Research Company, Chalk River, Ontario K0J 1J0.

Publications are available from Atomic Energy of Canada Limited, Whiteshell Nuclear Research Establishment, Pinawa, Manitoba R0E 1L0.

Index

Abandoned mines, 8
Accident conditions, 32
Acid rain, 7
Acoustic emission sensing instrument, 22
Aeromagnetic surveys, 24
Air travel, 40
Alberta's oil reserves, 16
Analogues, 36
Atmospheric research, 28
Atomic Energy Control Board, 34, 40, 41
Atomic Energy of Canada Limited, 10, 11, 16, 17, 38

Backfill, 18, 30, 31, 36
Bay of Fundy, 6
Bedded salt, 8
Biological effect, 15
Biosphere, 28
Borehole deformation gauge, 26
Boreholes, 21
Bowmanville, 6
Bruce A and B, 7
Bruce Nuclear Power Development, 7

Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program, 10, 11, 13, 34
Canadian Shield, see also Precambrian Shield, 8, 9, 10, 18, 20, 23, 24, 25, 29, 31, 34, 36
CANDU, 6, 7, 14, 15, 16
Carbon-14, 28
Carbon steel tubes, 20
Carlsbad, New Mexico, 12
Ceramic, 16
Ceramic pellets, 14
Cigar Lake, Canada, 37
Clay, 8, 36
Clay-sand sealing materials, 21, 30, 31
Coal-fired stations, 7, 14
Commission of European Communities, 12
Computer models, 26, 28, 34
Concrete dry storage canisters, 17, 19
Concrete shielding, 15
Copper, 20
Corrosion-resistant containers, 18, 21, 30, 37
Crash test, 32
Crown Corporation, 10

Darlington Nuclear Generating Station, 6
Disposal concept, 10, 18, 23, 31, 36, 37, 38, 40
Disposal site, 10
Disposal vault, 16, 18, 19, 20, 21, 28, 30, 31, 34, 36, 37, 40, 41
Disposal vault sealing, 34, 37
Douglas Point, 17
Drill core samples, 23
Drill sites, 23

Economic considerations, 34
Electromagnetic tomography, 22
Energy, Mines and Resources Canada, 8
Engineered barriers, 18, 19, 36, 37
Environmental Assessment and Review Process, 40
Environmental Assessment Panel, 40, 41
Environmental impact, 34
Environmental research, 28
Exchange agreements, 12
Exploratory drilling, 24

Fallout, 40
Finland, 12
Fission, 14, 16
Food chain, 14, 28, 34, 35
Fractures, 21, 23, 35
France, 16
Fuel bundle, 14
Fuel pellets, 14, 16, 19

Gabbro, 36
Gamma irradiation, 29
Gentilly-I, 17
Gentilly-II, 6
Geologic timescale, 8, 9
Geophysical studies, 24
Glass, 16
Glass beads, 20
Government of Canada, 6, 10
Government of Ontario, 6, 10, 11
Granite, 8, 12, 23, 24, 25, 30, 34, 36
Great Britain, 16
Grimsel Rock Laboratory, 12
Groundwater, 16, 18, 20, 23, 24, 25, 29, 30, 35, 37
Grouting, 21, 22, 31

Half-life (radioactive decay), 14, 15, 16
Hare Task Force, 8
Hare, Professor F. K., 8
"Hare Report," 8, 10
Helium, 29
Host rock, 23, 24, 30, 36
Hudson Bay, 9
Hydro Quebec, 6, 10, 17
Hydrogeological study, 24, 25
Hydraulic pressure, 26
Hydrostatic Test Facility, 20

Ice Age, 9
Immobilized Fuel Test Facility, 19
Infrared spectrometer, 27
Integration recorder, 27
Interim environmental assessment, 34
Interim storage, 10, 11
International Atomic Energy Agency of the United Nations, 12
Iodine, 29
Iron, 37

Kincardine, 7

Lake Huron, 7
Lake Ontario, 6, 7
Large Block Radionuclide Migration Facility, 27
Laser densitometer, 27
Leaching, 19, 28
Licensing, 34, 40

Manitoba, 25
Mechanical stress, 24
Medical diagnosis, 40
Minister of Environment, 40

Natural background radiation, 34, 40
Natural barriers, 18, 19, 36, 37
Natural reactor, 36, 37
Natural uranium, 14, 36
Nevada, 12
New Brunswick, 6, 41
New Brunswick Electric Power Commission, 6, 10, 17
Nuclear fission, 6
Nuclear-generated electricity, 6
Nuclear generating stations, 6, 8
Nuclear industry (Canada), 6
Nuclear waste management, 8

Oklo, West Africa, 36, 37
Olympic-sized swimming pool, 14
Ontario, 6, 41
Ontario Hydro, 6, 7, 10, 11, 32
Ontario Royal Commission on Electric Power Planning, 8
Organization for Economic Cooperation and Development/ Nuclear Energy Agency, 12
Overburden, 36
Overcoring, 26

Permanent disposal facilities, 8
Petroleum deposits, 8
Pickering Nuclear Generating Station, 6, 7, 17
Plant uptake, 29, 35
Plutonium, 15, 16
Point Lepreau Generating Station, 6, 17
Porosity test, 27
Porter, Dr. A., 8
Post-closure assessment, 34
Potash deposits, 8
Precambrian Shield, 9
Pre-closure phase, 34
Prototype waste container, 20
Public hearings, 10, 38
Public safety, 34

Quebec, 6, 41
Queen's University, 8

Radar surveys, 24
Radiation dose, 32, 34, 40
Radiation exposure, 32
Radioactive material, 6, 18, 19, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 35, 36
Radioactivity, 14, 15, 34
Radionuclide tracers, 12
Radon, 40
Recycling (reprocessing), 16, 41
Road cask, 11
Rock displacement, 26
Rock properties, 24

Sandia Laboratories, 32
Scientific Review Group, 40
Security, 34
Shaft sealing, 18, 21
Shafts, 21
Shale, 8
Site characterization, 24
Site selection, 41
Social impacts, 34
Sonar surveys, 24
Sorption, 23, 27
Soviet Union, 16
Spent Fuel Tests — Climax facility, 12
Sphagnum bog, 29
STRIPA, Sweden, 12
St. Lawrence River, 6
Stress measurements, 26
Subseabed, 8
Surface mapping, 24
Surface storage, 6
Sweden, 12
Switzerland, 12

Technical Advisory Committee, 38
"The Management of Canada's Nuclear Wastes," 8
Thermal stress, 24
Titanium, 20
Toronto, 6
Traffic accidents, 32
Transport cask, 30, 31, 32
Transport truck, 31
Transportation, 10, 11, 34
Triaxial compression machine, 21
Triaxial strain cell, 26
Trois-Rivières, 6

Uffen, Dr. R. J., 8
Underground Research Laboratory, 21, 24, 25
Underground vehicles, 30
United States, 12
University of Toronto, 8
Uranium ore, 18
Uranium oxide, 14, 15, 16
Used fuel bundles, 8, 17, 18, 20
Used nuclear fuel, 6, 8, 10, 14, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 31, 32, 37, 38, 40, 41

Waste form, 16
Waste Isolation Pilot Project, 12
Water-filled storage pools, 8, 11, 14, 17, 32
Whiteshell Nuclear Research Establishment, 17, 24

Zirconium tubes, 14, 19

Atomic Energy of Canada Limited
Corporate Office
344 Slater Street
Ottawa, Ontario
K1A 0S4

Tel (613) 237-3270

Atomic Energy of Canada Limited
Research Company
Head Office
344 Slater Street
Ottawa, Ontario
K1A 1E5

Tel (613) 236-6444

Atomic Energy of Canada Limited
Research Company
Whiteshell Nuclear Research Establishment
Pinawa, Manitoba
R0E 1L0

Tel (204) 753-2311

Atomic Energy of Canada Limited
Research Company
Chalk River Nuclear Laboratories
Chalk River, Ontario
K0J 1J0

Tel (613) 584-3311

Atomic Energy of Canada Limited
CANDU Operations
Sheridan Park Research Community
Mississauga, Ontario
L5K 1B2

Tel (416) 823-9040

Atomic Energy of Canada Limited
CANDU Operations
1155 Metcalfe Street
2nd Floor, Sun Life Building
Montreal, Quebec
H3B 2V6

Tel (514) 871-1116

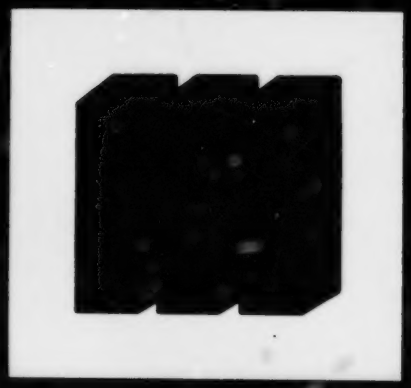


Table des matières

Introduction *3*

Faits marquants du déroulement du programme de recherches sur la gestion des déchets de combustible nucléaire du Canada *4*

Nécessité d'une technique canadienne d'évacuation (stockage permanent) *6*

Début du Programme de gestion des déchets au Canada *8*

Participants au programme et répartition des charges dans le cadre du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire *10*

Coopération internationale *12*

Objectif du programme de gestion des déchets du Canada *13*

Combustible nucléaire irradié *14*

Recyclage *16*

Stockage *17*

Concept d'évacuation canadien *18*

Recherche géoscientifique *24*

Recherche sur l'environnement *28*

Ingénierie de l'installation d'évacuation *30*

Transport *32*

Évaluations de l'environnement et de la sûreté *34*

L'école de la nature *36*

Examen et audiences publiques *38*

Possibilités à envisager pour l'avenir *41*

Liste des publications *42*

Index *44*

Le progrès de l'être humain lui apporte en partage la nécessité coûteuse de se défaire d'une quantité et d'une diversité croissantes de déchets créés par ses propres activités de production industrielle. Puisque certains de ces déchets présentent un danger pour l'être humain et son environnement naturel, on doit les surveiller avec soin.

La production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire produit des déchets qui sont radioactifs. Ces déchets sont actuellement stockés en toute sûreté aux sites mêmes des réacteurs. L'industrie nucléaire met au point des méthodes d'évacuation (stockage permanent) des déchets de combustible nucléaire de manière à réduire à un niveau négligeable tous les dangers possibles.

La présente brochure a pour objet de décrire le concept d'évacuation proposé. On y trouve aussi, expliqué dans les pages qui suivent, ce en quoi consistent les déchets de combustible nucléaire, les dangers éventuels qu'ils présentent pour l'être humain, les méthodes mises au point pour les évacuer en toute sûreté ainsi que le processus d'examen qui influera sur les décisions quant à l'acceptabilité du concept d'évacuation.

Faits marquants du déroulement du programme de recherches sur la gestion des déchets de combustible nucléaire du Canada

Début de la construction du LRS.

Les gouvernements canadien et de l'Ontario font une déclaration annonçant un processus d'examen du concept d'évacuation des déchets de combustible nucléaire. Ce processus prévoit un examen par un organisme de réglementation et des audiences publiques sur le concept d'évacuation avant que le choix éventuel d'un site d'évacuation ne commence.

1982

Les travaux sur le terrain débutent au site du Laboratoire de Recherches Souterrain (LRS) près de Lac du Bonnet au Manitoba. Le LRS doit permettre d'effectuer des recherches dans une grande formation de roche granitique semblable à beaucoup d'autres du bouclier canadien et d'améliorer les compétences qui seront nécessaires à la construction d'une enceinte d'évacuation de déchets de combustible nucléaire.

1981

1980

Des recherches intensives sur le terrain commencent en vue d'étudier les éléments géophysiques, géotechniques, hydrogéologiques et géologiques de la roche granitique du bouclier canadien. Début des recherches sur les formes de déchets, la mise au point des conteneurs, l'ingénierie de l'enceinte d'évacuation et la migration des radionucléides dans l'environnement.

1979

1978

Un Comité technique consultatif (CTC) composé de scientifiques et d'ingénieurs éminents indépendants représentant la communauté scientifique du Canada, est mis sur pied en vue de l'examen permanent du programme de gestion des déchets d'EACL.

1978

Ontario Hydro commence son étude du stockage provisoire et du transport du combustible nucléaire irradié.

Les déchets de combustible nucléaire provenant des réacteurs de recherches d'EACL sont stockés dans une piscine remplie d'eau près des réacteurs. Puisque le combustible nucléaire irradié peut être recyclé pour produire encore de l'énergie, on transforme les déchets radioactifs provenant des essais de recyclage en petites demi-sphères de verre à aluminosilicate et on les enfouit en vue d'étudier la lixiviation et la migration des déchets immobilisés enterrés. C'est le commencement de la recherche, au Canada, en vue du stockage permanent des déchets.

Fin des années 50

Le gouvernement canadien crée une société de la Couronne, Énergie atomique du Canada limitée (EACL). Cette société a pour mandat de mettre au point les applications pacifiques de l'énergie nucléaire et ses activités principales sont consacrées à la mise au point de la filière CANDU, de l'eau lourde, des radio-isotopes et de l'appareillage d'irradiation.

1952

1988

Le ministre de l'Énergie, Mines et Ressources soumet le concept d'évacuation des déchets au ministre de l'Environnement pour examen par un Groupe d'évaluation de l'environnement dans le cadre du Processus d'examen et d'évaluation en matière d'environnement (PEEE).

1987

Ontario Hydro met au point des châteaux de transport de combustible irradié et leur fait subir des essais; la CCEA délivre les permis.

1987

Deux comités permanents parlementaires font une enquête sur la question de l'évacuation des déchets nucléaires de haute radioactivité au Canada et publient des rapports.

1986

La deuxième évaluation provisoire du concept d'évacuation est soumise pour commentaires aux groupes d'examen public, réglementaire et scientifique.

1982

La première évaluation provisoire du concept d'évacuation des déchets est soumise pour commentaires aux groupes d'examen public, réglementaire et scientifique.

1978

Les gouvernements canadien et de l'Ontario annoncent un programme conjoint visant à l'évaluation et la mise au point de la technique nécessaire à la gestion sûre des déchets de combustible nucléaire et à l'évacuation de ceux-ci dans la roche granitique du bouclier canadien.

1978

La Commission royale de l'Ontario sur la planification de l'énergie électrique conclut que le stockage provisoire dans des piscines remplies d'eau est sûr, mais recommande que l'on poursuive l'étude de l'évacuation (stockage permanent) dans la roche granitique.

1978

EACL entreprend son évaluation du concept d'évacuation des déchets, à grande profondeur, dans les formations géologiques du bouclier canadien.

1977

Le rapport Hare examine les solutions possibles d'évacuation des déchets de combustible nucléaire pour le gouvernement du Canada. Il recommande que l'on pousse l'étude de l'enfouissement de ces déchets dans la roche granitique du bouclier canadien. La deuxième solution possible est l'enfouissement dans les formations salines.

1975

Les scientifiques et les ingénieurs travaillent à la conception, la mise au point et la démonstration du stockage à sec du combustible nucléaire irradié dans des conteneurs de béton comme solution de remplacement du stockage dans les piscines remplies d'eau. Les recherches montrent que chaque type de stockage serait sûr pendant de nombreuses décennies.

Nécessité d'une technique canadienne d'évacuation (stockage permanent)

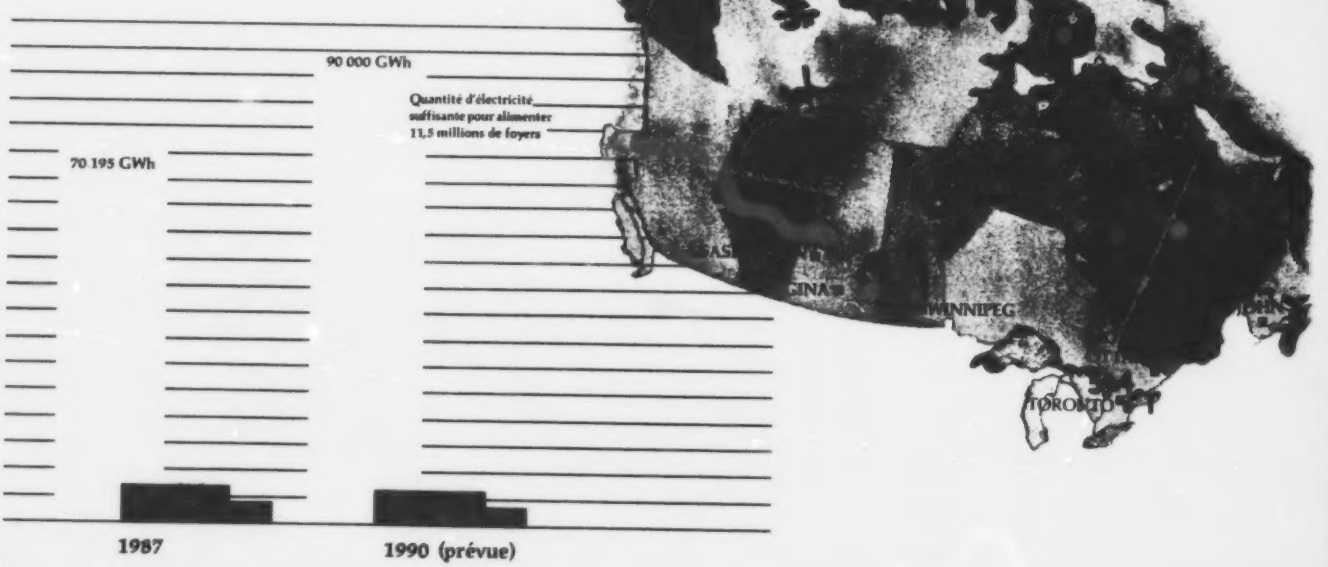
Quand les chercheurs canadiens ont commencé à maîtriser l'énergie de la fission nucléaire dans les années 50 et 60, ils devaient relever le défi de concevoir des centrales nucléaires qui pourraient produire de l'électricité de façon économique, fiable et sûre. L'industrie nucléaire canadienne est passée par plusieurs stades de démonstration pour en arriver à la construction de la centrale nucléaire de Pickering, située à l'est de Toronto. C'était la première utilisation à grande échelle de l'énergie nucléaire au Canada. La réussite de la centrale de Pickering, au début des années 70, a conduit à la construction d'autres centrales. D'ici 1990-1991, l'électricité d'origine nucléaire en Ontario fournira plus de 60% de l'électricité consommée par cette province. Des centrales nucléaires produisent aussi une partie de l'électricité consommée au Québec et au Nouveau-Brunswick.

Dès le début, il fut reconnu que la production d'électricité d'origine nucléaire donnerait lieu à une accumulation de déchets sous forme de faibles quantités de combustible nucléaire irradié contenant des matières fortement radioactives et qu'il faudrait protéger l'environnement contre ces déchets. Le combustible irradié est stocké au site même des réacteurs. Un confinement sûr a été prévu et le combustible peut être stocké ainsi pendant des décennies. Toutefois, le stockage en surface à long terme signifie que les générations futures devront surveiller le combustible irradié et assurer l'entretien des installations de stockage et, par la suite, reconstruire celles-ci. Les gouvernements canadien et de l'Ontario ont décidé de mettre au point la technique d'un système de stockage permanent qui ne laissera pas aux générations futures le fardeau de la gestion du combustible irradié.

Ontario Hydro construit la centrale nucléaire de Darlington, près de Bowmanville, à l'est de Toronto en Ontario. Cette centrale de quatre tranches (réacteurs) située en bordure du Lac Ontario, produira plus de 3 500 MW(e) quand elle sera en exploitation. La première tranche de Darlington doit être mise en service en 1989. On s'attend à ce que toutes les quatre tranches soient en exploitation d'ici 1992-1993.

Énergie Nouveau-Brunswick est à la fois propriétaire et exploitant de la centrale nucléaire de Pointe Lepreau, située sur la côte de la baie de Fundy. Cette centrale de 680 MW(e) est la première de la série CANDU 6. L'électricité d'origine nucléaire produite à Pointe Lepreau satisfait environ 30% des besoins en électricité du Nouveau-Brunswick. Cette centrale a commencé à produire de l'électricité en 1982 et, jusqu'en 1986, sa production a dépassé 18 milliards de kilowattheures. Pour produire le même nombre de kilowattheures dans une centrale au mazout, il faudrait 28 millions de barils de mazout qui coûteraient plus de 900 millions de dollars.

La centrale nucléaire Gentilly-2 qui fait partie de la série CANDU 6, est située en bordure du fleuve St-Laurent, en face de Trois-Rivières au Québec. Hydro-Québec [illegible] propriétaire.



Quantité d'électricité produite par les centrales nucléaires de l'Ontario, du Nouveau-Brunswick et du Québec en 1987. On prévoit qu'en 1990 l'électricité d'origine nucléaire représentera en Ontario plus de 60% de toute l'électricité qui y sera produite.

Ontario
Nouveau-Brunswick
Québec

La centrale nucléaire d'Ontario Hydro à Pickering est située en bordure du Lac Ontario, à l'est de Toronto en Ontario. Les huit tranches (réacteurs) de cette centrale ont une puissance totale d'environ 4 300 MW(e). Depuis que la première tranche CANDU a été mise en service à Pickering en 1971, l'Ontario a réduit de plus de 2 milliards de dollars ses achats de charbon pour alimenter en électricité la population de la province. En 1985, les centrales nucléaires de l'Ontario ont évité à cette province la combustion des 16 millions de tonnes de charbon qu'autrement elle aurait importées des É.-U. L'utilisation de l'énergie nucléaire comme source de remplacement permettra de réduire les rejets des centrales au charbon qui causent les pluies acides. Le programme nucléaire d'Ontario Hydro permet d'éviter l'évacuation dans l'atmosphère de 1,5 million de tonnes de gaz acides par an.

Le complexe nucléaire de Bruce d'Ontario Hydro est situé en bordure du Lac Huron près de la ville de Kincardine. La puissance électrique brute totale de ce site est d'environ 7000 MW. De ce fait, le complexe de Bruce est l'installation de production d'électricité d'origine nucléaire la plus grande du monde occidental.

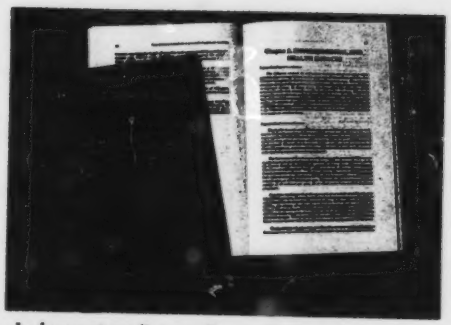
Début du programme de gestion des déchets au Canada

En 1977, Énergie, Mines et Ressources Canada a lancé une étude dirigée par F.K. Hare, professeur à l'Université de Toronto, en vue d'identifier des méthodes d'évacuation convenables qui pourraient être mises en oeuvre au Canada. Ce rapport intitulé "La gestion des déchets nucléaires du Canada," établit la base de la politique du gouvernement et du programme de recherches sur l'évacuation du combustible nucléaire irradié qui en a résulté.

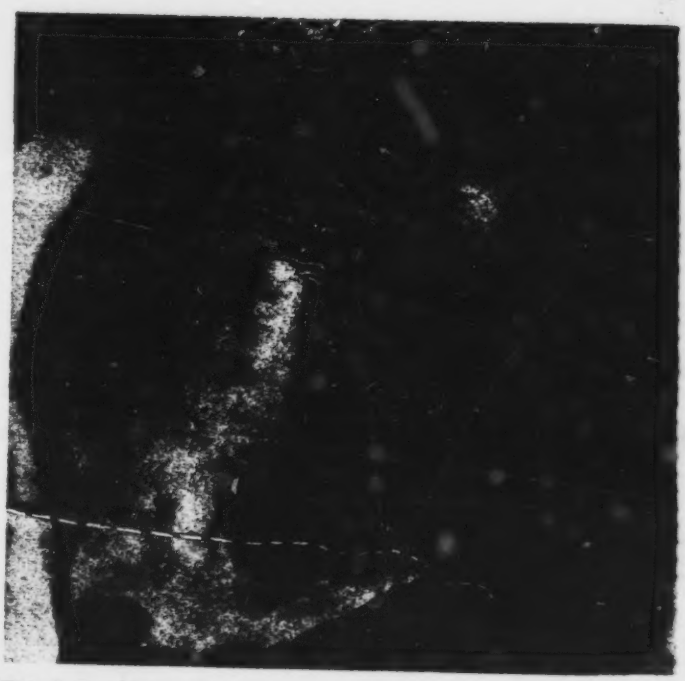
Le rapport Hare traite de l'enfouissement en milieux géologiques ainsi que d'autres possibilités telles que le lancement des déchets dans l'espace ou dans le soleil, le stockage dans les calottes glaciaires, le stockage en surface ou le confinement dans des conteneurs et le stockage dans les formations géologiques sous les fonds marins. Parmi toutes ces solutions, on a considéré que l'enfouissement dans les formations géologiques était le plus réalisable. Le Groupe de travail a examiné différents milieux géologiques tels que le granite, les formations salines, les argiles, les schistes argileux, les roches d'origine volcanique ainsi que les mines abandonnées et les formations géologiques sous les fonds marins. Il a recommandé que le Canada étudie la possibilité d'évacuer (stocker) les déchets de combustible nucléaire à grande profondeur dans la roche granitique stable du bouclier canadien.

La seconde solution recommandée a été les grands gisements de sel. Toutefois, la plupart de ceux-ci se trouvent dans des provinces qui n'ont pas encore de programme nucléaire établi et ils coïncident, dans bien des cas, avec des gisements de pétrole et de potasse.

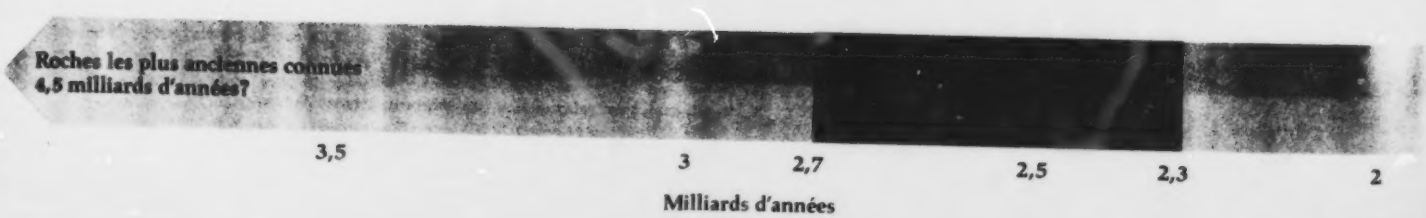
Entre 1975 et 1980, la Commission royale de l'Ontario sur la planification de l'énergie électrique a examiné tous les aspects de la planification de l'énergie électrique et étudié les rapports sur la gestion des déchets nucléaires rédigés par MM. Hare et R.J. Uffen, doyen de la faculté des sciences appliquées à l'Université Queen's. La Commission, présidée par M.A. Porter, a déclaré que la méthode actuelle de stockage des grappes de combustible dans des piscines remplies d'eau des centrales nucléaires était sûre et efficace mais elle a fait ressortir le besoin de mettre au point des installations d'évacuation (stockage permanent) en vue d'isoler les déchets nucléaires des écosystèmes du monde. La Commission a recommandé qu'on poursuive l'étude du concept canadien d'évacuation dans la roche granitique du bouclier canadien (bouclier précambrien).

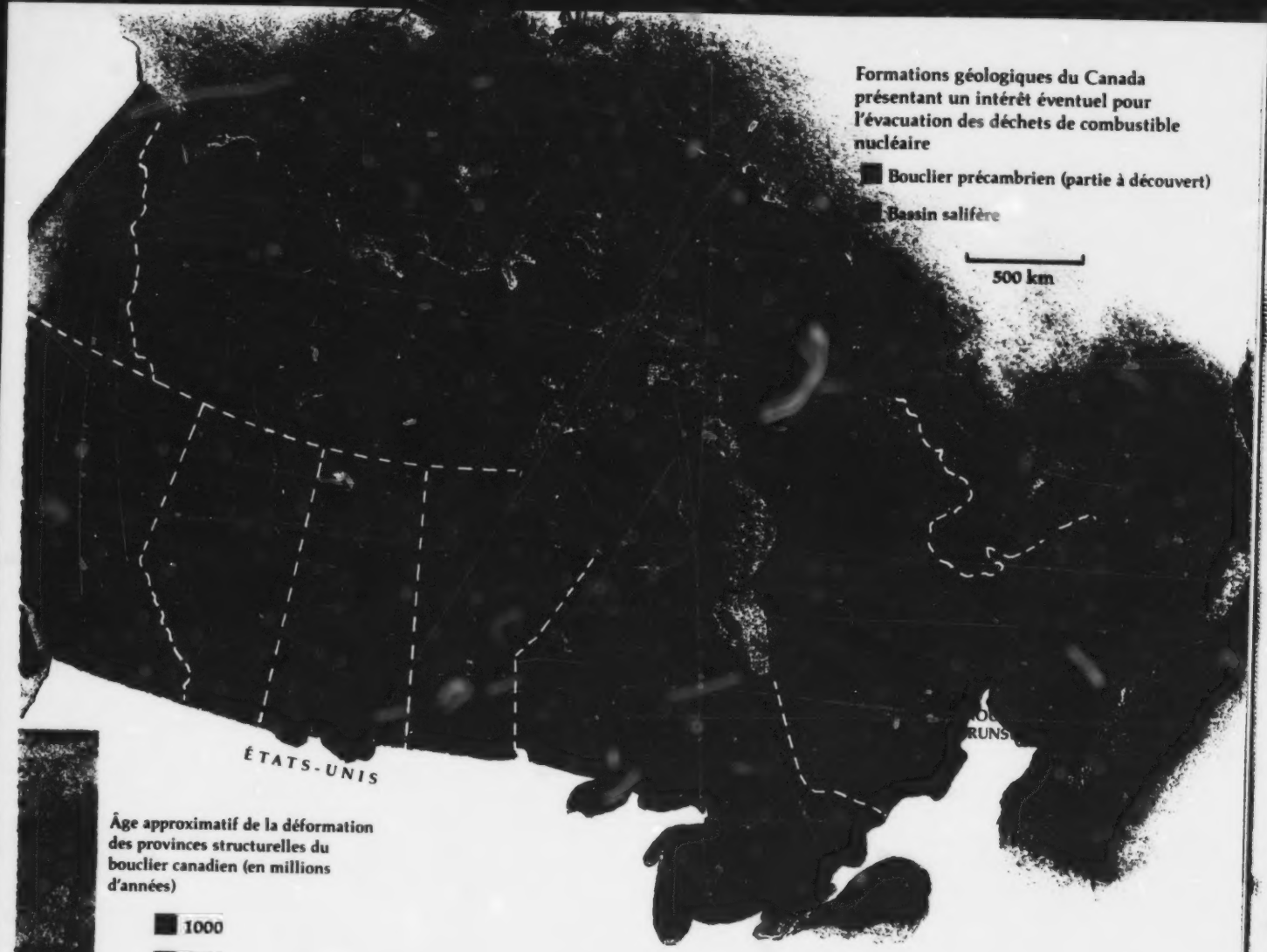


Le document que l'on appelle communément le "rapport Hare" donne la base de la recherche et du développement du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire.



Tirée de Stern C.W., Carroll R.L., Clark T.H. *Geological evolution of North America.* 3e éd. (John Wiley & Sons, 1979).





La roche granitique du bouclier canadien est restée stable pendant des centaines de millions d'années et au cours des époques glaciaires. Les scientifiques croient que cette roche assurera un milieu convenable pour l'enfouissement du combustible nucléaire irradié canadien parce que la roche restera vraisemblablement stable pendant des millions d'années — beaucoup plus longtemps que le temps nécessaire pour que la radioactivité des déchets de combustible nucléaire enfouis descende jusqu'au niveau de radioactivité du minerai d'uranium naturel. Le Canada possède aussi des formations salines créées il y a 400 millions d'années (Ouest du Canada, Ontario et Baie d'Hudson) et 200 millions d'années (Manitoba) mais elles n'ont pas fait l'objet d'études approfondies en vue de l'évacuation (stockage permanent) du combustible nucléaire irradié.

Les gouvernements canadien et de l'Ontario ont, en 1978, sur les recommandations de l'étude d'Hare, lancé le Programme de gestion des déchets de combustible nucléaire. Énergie atomique du Canada limitée (EACL), une société de la Couronne, a reçu le mandat d'évaluer le concept d'évacuation du combustible irradié, à grande profondeur, dans la roche dure du bouclier canadien et de mettre au point et démontrer des techniques associées. On a demandé à Ontario Hydro, la compagnie d'électricité provinciale, de mettre au point des techniques de stockage provisoire et de transport du combustible nucléaire irradié.

En 1981, les gouvernements ont annoncé qu'un examen technique et des audiences publiques auraient lieu au début des années 90 en vue de savoir si le concept d'évacuation est acceptable. La sélection d'un site d'évacuation ne commencera qu'après la prise de décision.

La responsabilité de la gestion du combustible nucléaire irradié incombe à ceux qui le produisent: les compagnies d'électricité canadiennes exploitant des centrales électronucléaires. Depuis plusieurs années, les compagnies d'électricité perçoivent de leurs clients une surtaxe sur l'usage d'électricité d'origine nucléaire, laquelle leur permettra de réaliser la gestion des déchets.

Ontario Hydro, Énergie Nouveau-Brunswick et Hydro-Québec incorporent toutes, à leurs factures d'électricité, une taxe pour l'évacuation des déchets. En Ontario, le prix de détail de l'électricité est d'environ 6 cents par kWh et la taxe perçue pour l'évacuation en représente moins de 1 pour-cent.

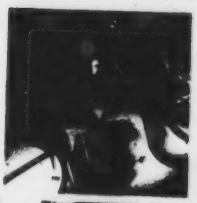
GOUVERNEMENT CANADIEN

ÉNERGIE ATOMIQUE DU CANADA LIMITÉE

Chargée de la mise au point de techniques d'immobilisation et d'évacuation (stockage permanent) du combustible irradié

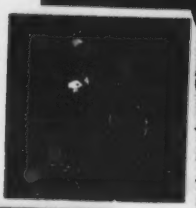
La recherche couvre:

la stabilité du combustible irradié



la technique des conteneurs

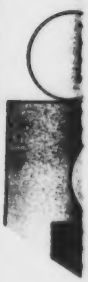
les matériaux de scellement d'étanchéité et de remblayage



les barrières géologiques

la recherche sur l'environnement

les programmes informatiques (de calcul) permettant d'évaluer le comportement du combustible enfoui, des milliers d'années dans l'avenir



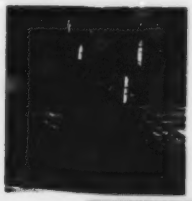
dans le cadre du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire

GOUVERNEMENT DE L'ONTARIO

ONTARIO HYDRO

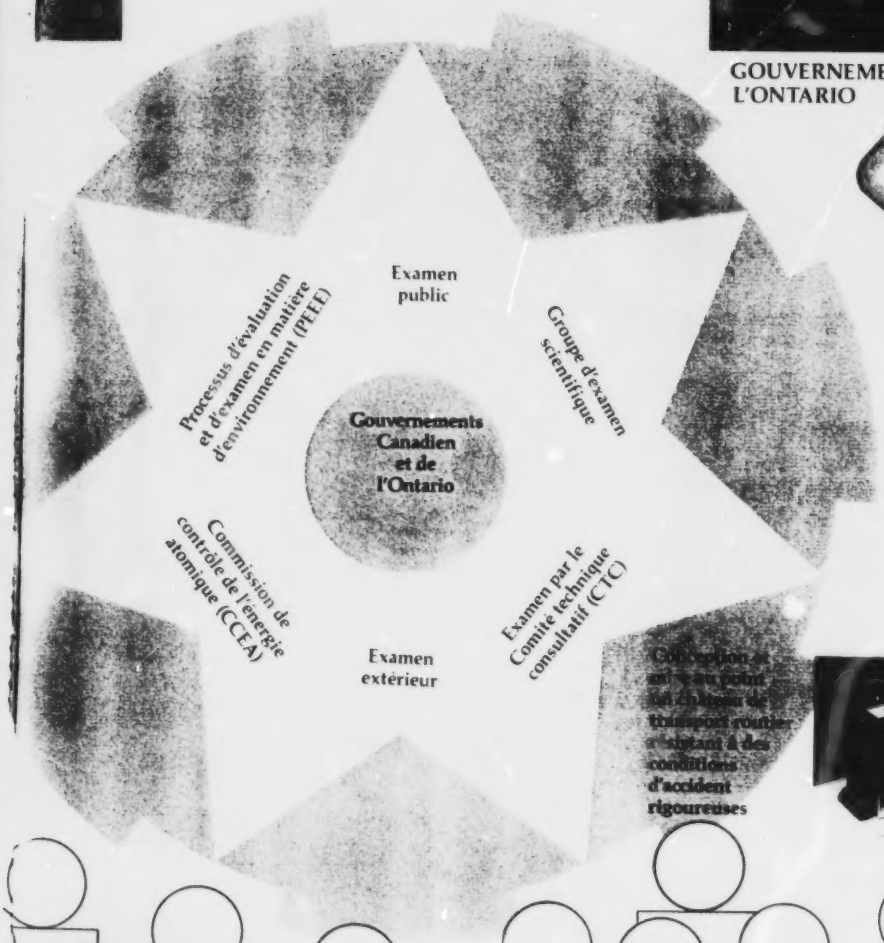
Chargée de la mise au point de techniques de stockage provisoire et de transport du combustible nucléaire irradié

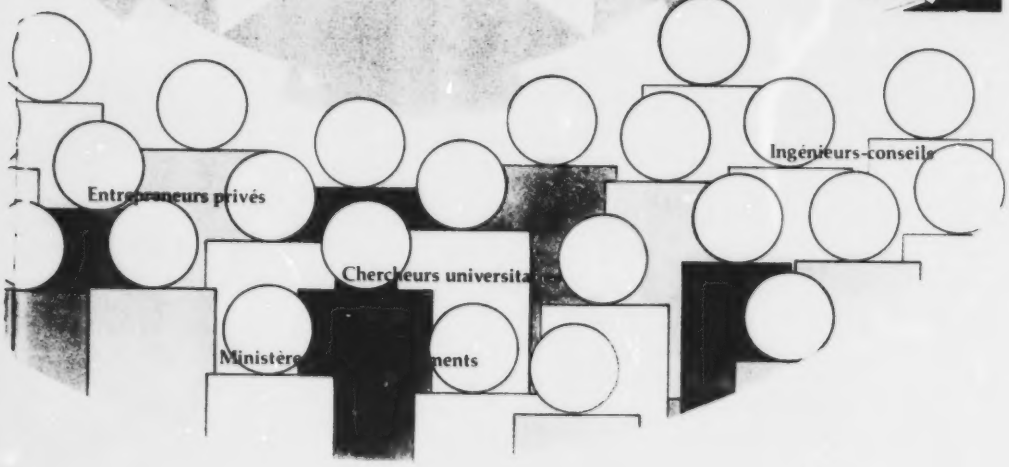
La recherche couvre:



le stockage — recherche sur les piscines remplies d'eau et surveillance

l'aide à EACL — RD





Coopération internationale

Aujourd'hui, de nombreux pays ayant un programme électronucléaire proposent un système d'évacuation (stockage) géologique souterrain quelconque. Le Canada suit de près leurs recherches sur d'autres milieux géologiques et prend part à un échange d'information scientifique en vue de se tenir au courant de la mise au point d'autres techniques tout en engageant ses principales ressources dans l'étude de la roche granitique.

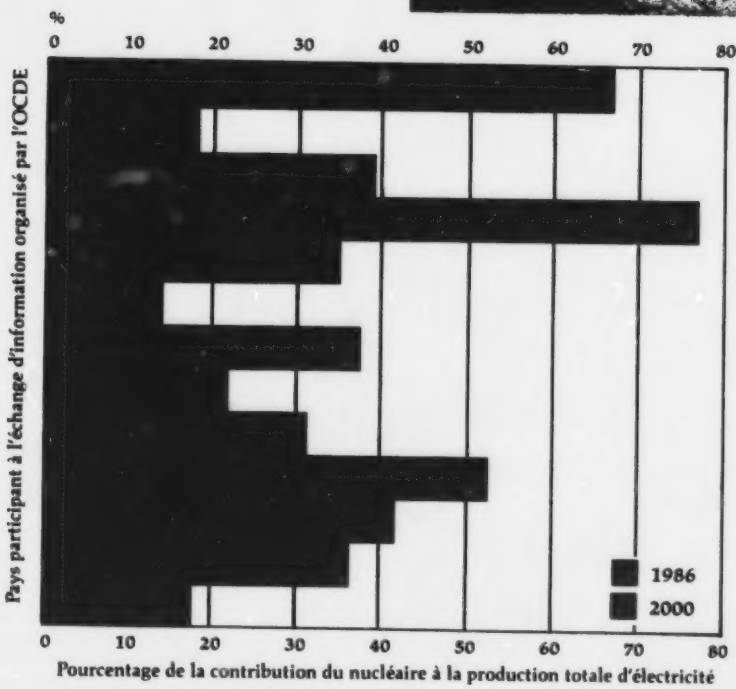
Le Canada a signé des accords officiels d'échange d'information sur la gestion des déchets de combustible nucléaire avec les États-Unis, la Suède, la Finlande et la Commission des communautés européennes. Des ingénieurs et scientifiques canadiens font partie de groupes de travail internationaux de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN/OCDE) et de l'Agence internationale de l'énergie atomique des Nations unies.

Un essai quant aux propriétés de gonflement des argiles a été effectué sous terre à Stripa en Suède.

On effectue des essais sur des matériaux éventuels à retenir (candidats) pour l'évacuation, au site d'essais du Projet Pilote d'Isolation des Déchets (Waste Isolation Pilot Project) dans une formation saline à Carlsbad au Nouveau-Mexique.

Un conteneur de combustible irradié, descendu de la surface à une profondeur de 420 mètres, est déposé sur un véhicule de transport à l'Installation d'Essais du Combustible Irradié Climax (Climax Spent Fuel Test Facility) au site d'essais du Nevada aux États-Unis.

Dans cette galerie du Laboratoire dans la Roche de Grimsel (Grimsel Rock Laboratory) en Suisse, on peut voir les systèmes collecteurs d'eau d'une fracture verticale coupant la galerie.



Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, *Electricity, Nuclear Power and Fuel Cycle in OECD Countries: Main Data*, (Paris, 1987) p. 26.

Objectif du programme de gestion des déchets du Canada

L'objectif général du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire est de mettre au point et démontrer une technique d'évacuation (stockage permanent) des déchets de combustible nucléaire qui assurera que ces déchets n'auront aucun effet nuisible important sur l'être humain et l'environnement en aucun moment dans l'avenir.

Cet objectif comprend deux principes fondamentaux: la sûreté — assurer une gestion des déchets radioactifs de façon à ce que les dangers soient négligeables; la responsabilité — assurer une gestion des déchets radioactifs en vue de réduire au minimum la nécessité, pour les générations futures, de s'engager dans la gestion des déchets produits aujourd'hui.

Combustible nucléaire irradié

Le combustible utilisé pour la production d'électricité dans les réacteurs CANDU est le bioxyde d'uranium (UO_2) obtenu par raffinage du minerai d'uranium naturel. Ce matériau est comprimé et fritté en pastilles massives de céramique, chacune ayant la taille et la forme d'une pile de 16 pièces de dix cents. Ces pastilles sont scellées dans des tubes métalliques (zirconium) spéciaux qui sont soudés ensemble pour former une grappe de combustible.

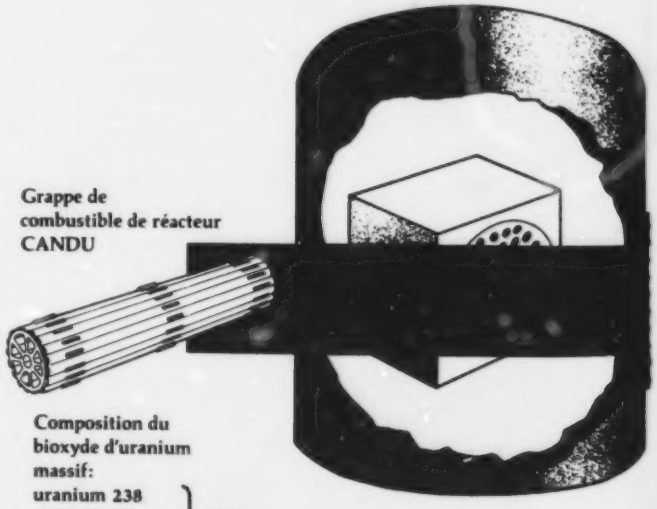
Quand une grappe de combustible est placée dans un réacteur, les atomes d'uranium des pastilles de combustible se séparent (fission), pour donner lieu à la formation de nouveaux éléments radioactifs dans ces mêmes pastilles de combustible. Par la suite, ces nouveaux éléments gênent le processus de fission et réduisent l'efficacité de la grappe de combustible nucléaire. Après un séjour d'environ 18 mois dans le réacteur, alors que moins de 2 pour-cent de l'uranium qu'elle contient s'est transformé en nouveaux éléments, la grappe de combustible est retirée du réacteur et placée dans une piscine de stockage remplie d'eau. Comme ce combustible nucléaire irradié est fortement radioactif, on doit le gérer avec précaution. Une épaisseur de béton ou de roche d'environ un mètre ou une hauteur d'eau d'environ 3 mètres suffisent pour arrêter le rayonnement.

Comme la plupart des nouveaux éléments radioactifs se transforment très rapidement en éléments stables, la radioactivité décroît très rapidement. En fait, une heure après le retrait de la grappe du réacteur, la radioactivité a diminué de plus de 60 pour-cent. Au bout de dix ans, la radioactivité du combustible irradié est 1000 fois moins forte qu'elle ne l'était au moment du retrait de la grappe du réacteur.

Au bout de 500 ans environ, l'intensité du rayonnement pénétrant de la grappe de combustible irradié a diminué au point où une personne peut se tenir à proximité de cette grappe sans danger. Toutefois, certains des éléments (à plus longue durée de vie) du combustible irradié, bien qu'ils émettent une énergie beaucoup moins pénétrante, pourraient être dangereux pour la santé s'ils étaient ingérés. Ces éléments pourraient être dangereux s'ils se trouvaient dans l'air, l'eau potable ou les aliments. C'est pourquoi le combustible nucléaire irradié doit être évacué de façon permanente pour qu'il ne parvienne pas jusque dans notre environnement en quantités suffisantes pour nuire à l'être humain.

Un des avantages de l'énergie nucléaire est la faible quantité de combustible nécessaire pour produire une grande quantité d'énergie. Une grappe de combustible de réacteur CANDU produit autant d'énergie que 400 tonnes de charbon, soit une quantité suffisante pour subvenir aux besoins en électricité du foyer canadien moyen pendant plus de 100 ans. À la fin de 1988, la quantité de combustible irradié stockée était d'environ 12300 tonnes. Cette quantité remplirait une piscine olympique. Cela représente, en fait, une faible quantité de déchets par rapport à la grande quantité d'énergie produite.

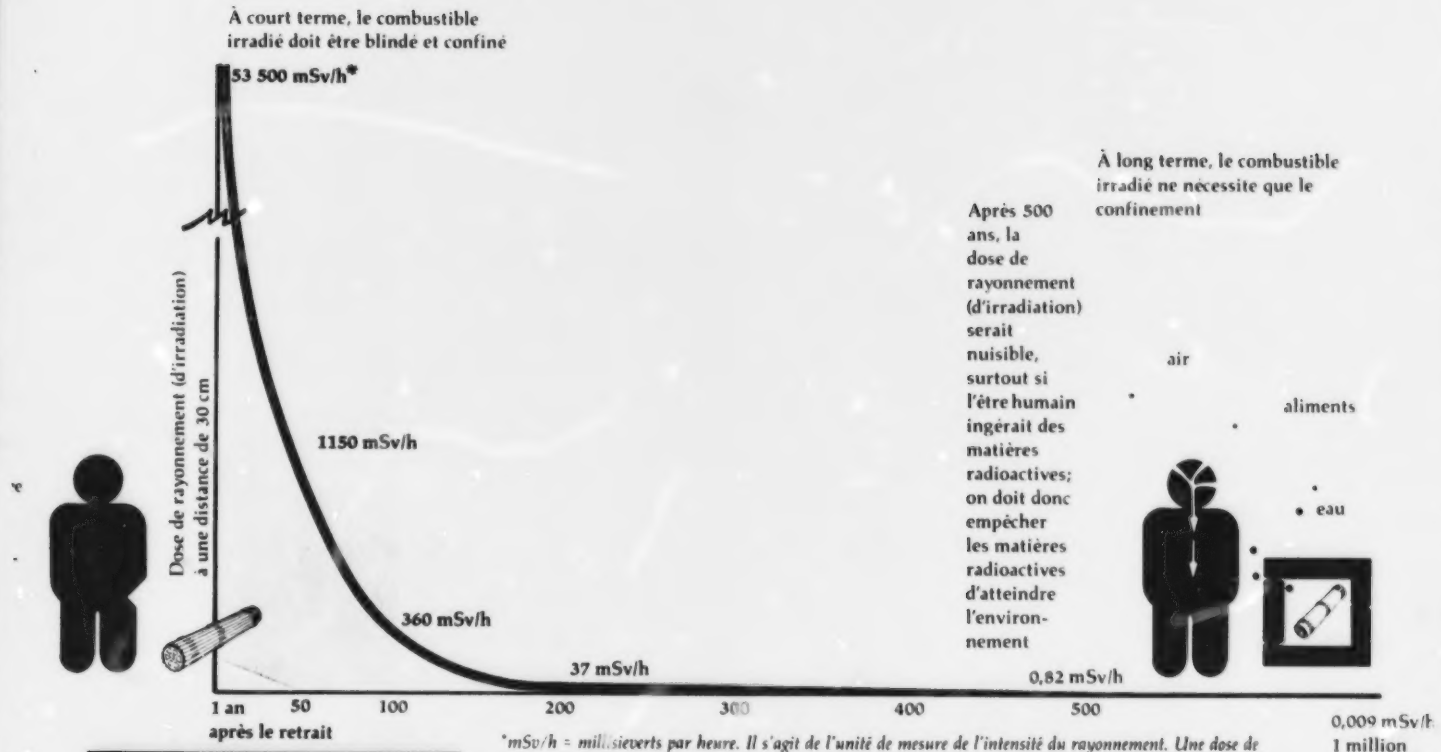
L'exposition à une grappe de combustible non blindé (protégée) se trouvant à une distance de 30 cm, un an après le retrait de celle-ci du réacteur, serait mortelle pour l'être humain en environ 10 minutes.



Grappe de combustible de réacteur CANDU

Composition du bioxyde d'uranium massif:
uranium 238
uranium 235
uranium 234
} **100%**

Au cours du processus de fission se produisant dans un réacteur, moins de 2 pour-cent de l'uranium contenu dans le combustible se transforme en nouveaux éléments. Un bon nombre de ces éléments sont radioactifs et il faut prévoir un blindage (protection) quand on les retire du réacteur.



mSv/h = millisieverts par heure. Il s'agit de l'unité de mesure de l'intensité du rayonnement. Une dose de rayonnement d'un millisievert produit un effet biologique constant quelque soit le type de rayonnement (voir aussi p. 40)

1 m de béton ou 3 m d'eau suffisent pour protéger en toute sûreté contre les éléments radioactifs

Le combustible de réacteur CANDU irradié se compose surtout de bioxyde d'uranium original. Seul 0,65 pour-cent se transforme en nouveaux éléments radioactifs. Les éléments émetteurs de rayonnement gamma pénétrant se transforment par désintégration en éléments stables en 500 ans, pour la plupart. Les éléments qui émettent un rayonnement alpha et bêta moins pénétrant durent beaucoup plus longtemps mais ne sont nuisibles pour l'être humain que s'ils sont ingérés.

Composition du combustible irradié de réacteur CANDU

	(% en poids)	
Uranium original (inchange) (^{238}U, ^{235}U, ^{234}U)	98,70%	
Autres isotopes de l'uranium (^{236}U, ^{233}U, ^{232}U)	0,08%	Nouveaux éléments radioactifs 0,65%
Plutonium	0,40%	
Autres actinides	0,01%	
Produits de fission radioactifs	0,16%	
Produits de fission stables	0,65%	

Le recyclage

Au cours de la fission de l'uranium dans un réacteur, une petite quantité d'un nouvel élément, le plutonium 239, se forme dans le combustible irradié. On peut séparer chimiquement le plutonium 239 du combustible irradié dans une usine de retraitement et le mélanger à de l'uranium pour fabriquer du combustible neuf ou on peut l'utiliser dans un cycle du combustible différent.

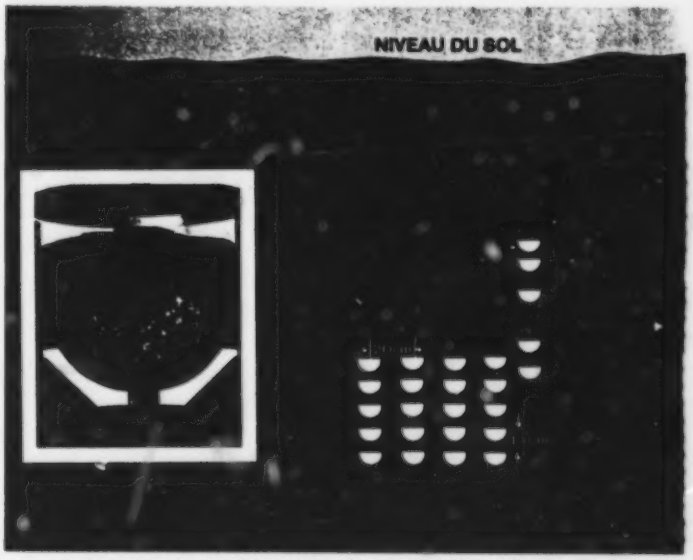
Des usines de retraitement sont en exploitation industrielle en France, en Grande-Bretagne, au Japon et en Union Soviétique. Au Canada, il est moins cher d'extraire l'uranium des mines pour fabriquer du combustible neuf que de recycler le combustible irradié. Cependant, avant l'an 2000, le contenu énergétique du combustible irradié stocké du Canada dépassera celui du reste des réserves classiques (prévues) de pétrole de l'Alberta.

Lors du recyclage, le combustible irradié est dissout dans l'acide et les éléments utiles sont séparés chimiquement. La solution radioactive restante peut être solidifiée et incorporée à du verre ou à un céramique. Au cours des années 60, EACL s'est livrée à l'étude de cette technique de solidification et a effectué des essais à long terme quant à la stabilité du verre en tant que forme de déchet.

Le recyclage a été proposé comme moyen de réduction du volume des déchets nucléaires. Toutefois, après examen de tous les facteurs pertinents, il est évident que le recyclage augmente, en fait, le volume des déchets. Il ne semble donc pas souhaitable de recycler le combustible irradié de réacteur CANDU strictement pour les avantages que cela présente sur le plan de la gestion des déchets.

Le recyclage du combustible irradié de réacteur CANDU ne peut devenir viable économiquement, dans l'avenir, que si le prix de l'uranium augmente sensiblement. Si le Canada décide de construire une usine de retraitement à ce moment-là, la technique d'immobilisation des déchets résultants sera déjà disponible. En fait, des techniques d'immobilisation de ces déchets dans un verre résistant sont déjà utilisées à l'échelle industrielle en France et en Grande-Bretagne.

À la fin du recyclage du combustible irradié de réacteur CANDU, on obtient un sous-produit liquide contenant des déchets radioactifs. L'objectif fondamental est de transformer ce liquide en un solide stable, très insoluble, à des fins d'évacuation permanente. Au Canada, la recherche est centrée sur la mise au point et l'essai de procédés d'immobilisation des déchets et produits (tels que les verres spéciaux, les céramiques et les vitrocéramiques) qui assureront le confinement (isolement) à long terme des déchets de recyclage.



Pour étudier la libération des déchets radioactifs immobilisés dans différents types de verre, on a enfoui des échantillons de déchets, à 4 m de profondeur, dans du sol sablonneux, en milieu d'écoulement d'eau souterraine. La vitesse de dissolution des déchets a été si faible que l'eau est demeurée constamment conforme aux normes d'eau potable. Des essais de vitrification plus récents ont produit des formes de déchets vitrocéramiques semblables à des matières étant restées stables dans la nature pendant de longues périodes. Les techniques employées actuellement au Canada permettent de produire des formes de déchets qui sont 100 fois moins solubles que le verre à vitres courant et dont la résistance est voisine de celle des pastilles de combustible de bioxyde d'uranium original.

Stockage

Le combustible nucléaire irradié est stocké sous l'eau dans de grandes piscines en béton sur le site même des centrales. L'eau fait fonction de barrière de protection entre le personnel d'exploitation de la centrale et le rayonnement émis par le combustible. En outre, elle sert à refroidir le combustible.

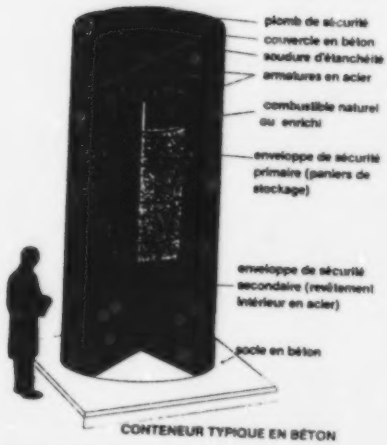
Au Canada, on stocke le combustible irradié sous l'eau depuis plus de 30 ans et on n'a observé aucun signe de détérioration de ce combustible. L'eau ne devient pas radioactive et des filtres sont prévus pour retenir les particules radioactives en cas d'éventuelles petites fuites des grappes de combustible.

À l'Établissement de recherches nucléaires de Whiteshell d'EACL au Manitoba, au prototype de centrale nucléaire CANDU à Douglas Point et au prototype de centrale nucléaire Gentilly-1, le combustible irradié est stocké dans des conteneurs en béton. À la centrale nucléaire de Pointe Lepreau au Nouveau-Brunswick, on employera également cette méthode pour augmenter sa capacité de stockage. La paroi en béton d'un mètre d'épaisseur du conteneur arrête le rayonnement pénétrant et deux revêtements intérieurs étanches, en acier inoxydable, empêchent les fuites de matières radioactives. Le refroidissement est par convection naturelle.

On peut continuer à utiliser ces deux méthodes de stockage en toute sûreté pendant de nombreuses décennies. Toutefois, ces systèmes de stockage finiront par se détériorer et auront alors besoin d'attention et d'entretien. L'entretien devra se poursuivre bien avant dans l'avenir et la responsabilité de garder ces systèmes incombera aux générations futures. L'évacuation permanente (stockage permanent), par contre, ne nécessiterait pas d'attention et d'entretien continus.

Conteneurs de stockage à sec, en béton, à Douglas Point. Un pont-roulant sert à transférer le combustible irradié dans les conteneurs.

Des pièces usagées radioactives provenant du cœur des réacteurs 1 et 2 de Pickering sont stockées dans des conteneurs en béton sur le site même de la centrale de Pickering.



CONTENEUR TYPIQUE EN BÉTON

Après une période de refroidissement dans l'eau d'environ cinq ans, les grappes de combustible irradié peuvent être transférées dans des conteneurs de stockage de surface. L'épaisseur de paroi (un mètre) de ces conteneurs assure une protection suffisante contre le rayonnement pénétrant.

Cette piscine de stockage remplie d'eau de la centrale nucléaire de Pickering assure le stockage des grappes de combustible irradié depuis plus de 15 ans. Le rayonnement gamma pénétrant émis par les grappes de combustible irradié est arrêté par une hauteur d'eau d'environ 3 mètres couvrant celles-ci. La photo en cartouche est un gros plan d'un empilement de grappes de combustible irradié.

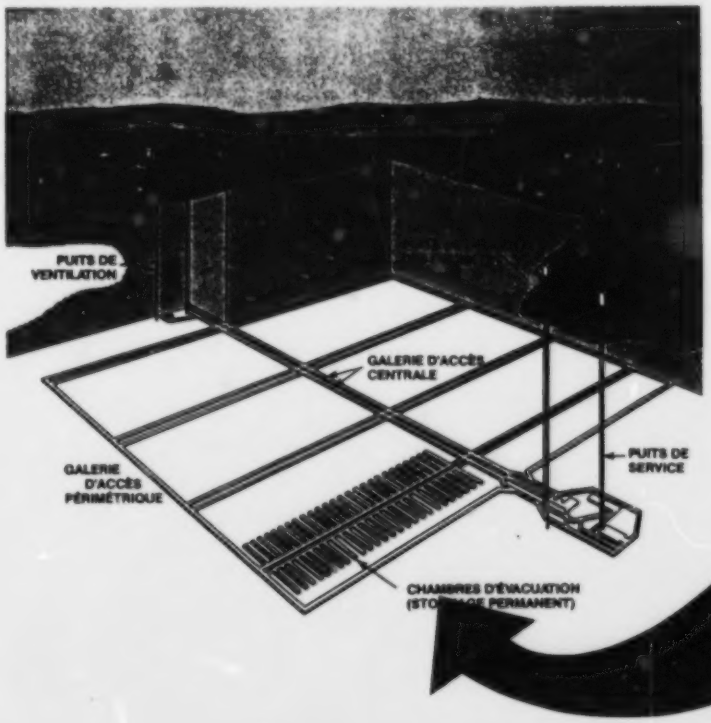
Concept d'évacuation canadien

Le concept canadien d'évacuation permanente (stockage permanent) du combustible irradié repose sur le confinement, à grande profondeur, dans la roche stable du bouclier canadien, d'une façon très semblable à l'isolement, par la nature, des gisements de minerai d'uranium de l'environnement pendant des centaines de millions d'années.

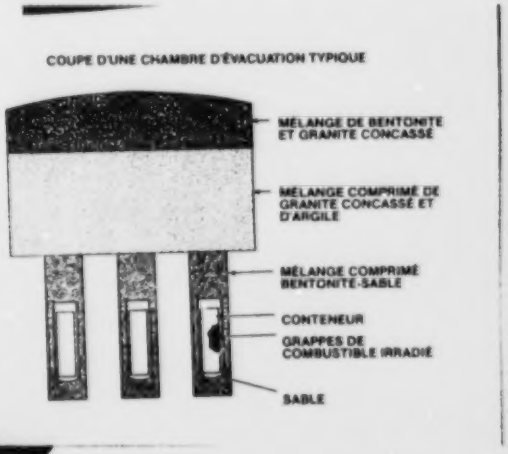
L'enceinte d'évacuation ressemblerait, à certains égards, à une mine profonde. Le combustible irradié (sous forme de céramique massif difficile à dissoudre) serait scellé à l'intérieur de conteneurs résistants à la corrosion. Les conteneurs seraient placés dans des trous creusés dans le sol des chambres de stockage. Un réseau souterrain de galeries et de chambres de stockage d'une superficie d'environ 2 km x 2 km serait suffisant pour recevoir 191 000 tonnes de combustible irradié. Sur la base de la puissance électronucléaire installée et prévue, une seule enceinte d'évacuation pourrait recevoir tout le combustible irradié produit du Canada au-delà de l'an 2035. Une série de barrières naturelles et ouvragées (artificielles) assurerait l'isolement à long terme des matières radioactives du combustible irradié.

Étant donné que le seul moyen concevable, par lequel les matières radioactives enfouies peuvent parvenir à la surface et contaminer l'environnement, est la dissolution et la migration dans les eaux souterraines, le combustible irradié et les conteneurs doivent être très insolubles et entourés de barrières qui bloqueront l'écoulement des eaux, retiendront et ralentiront ces matières radioactives qui s'échappent par la suite.

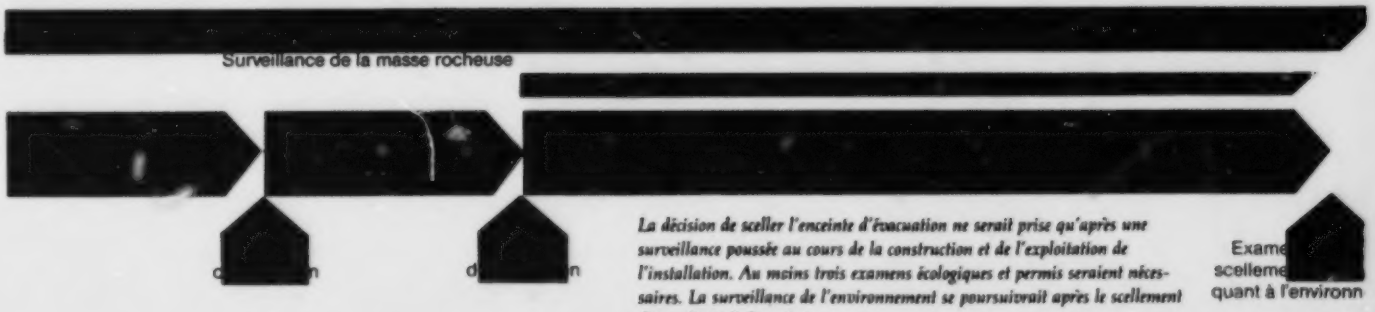
L'isolement à long terme de déchets de combustible nucléaire serait assuré par des barrières ouvragées telles que le combustible proprement dit, le conteneur, les matériaux de remblayage de l'enceinte, les matériaux de scellement d'étanchéité, et par des barrières naturelles telles que la roche à une profondeur de 500 à 1000 mètres.



Le concept canadien d'évacuation définitive du combustible irradié repose sur l'enfouissement des conteneurs de combustible irradié à une profondeur de 500 à 1000 m dans la roche stable du bouclier canadien.



TEMPS (ANNÉES)



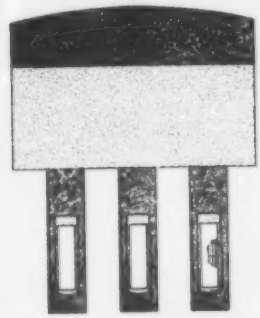
La décision de sceller l'enceinte d'évacuation ne serait prise qu'après une surveillance poussée au cours de la construction et de l'exploitation de l'installation. Au moins trois examens écologiques et permis seraient nécessaires. La surveillance de l'environnement se poursuivrait après le scellement d'étanchéité de l'enceinte.

Exame
scelleme
quant à l'environn

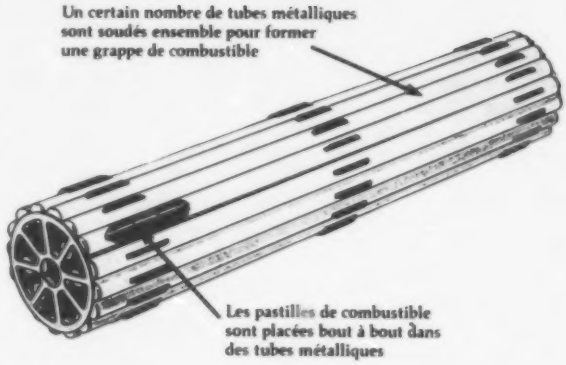
BARRIÈRES OUVRAGÉES (ARTIFICIELLES)
Combustible irradié

La plus grande partie de la matière radioactive demeurerait bloquée à l'intérieur des pastilles de combustible céramique qui sont très peu solubles dans l'eau. Les pastilles de combustible sont scellées dans des tubes en alliage de zirconium pouvant assurer une barrière supplémentaire contre la pénétration de l'eau. Des études effectuées pour déterminer le comportement du combustible irradié dans les conditions de température, de pression et géochimiques qu'on pourrait rencontrer dans une enceinte d'évacuation, montrent que le combustible irradié est une forme de déchet très stable.

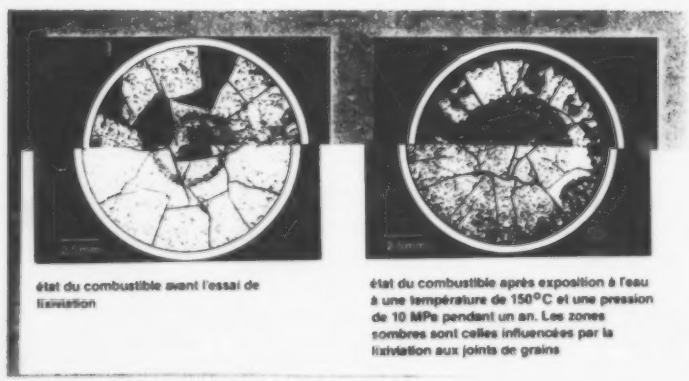
1re barrière COMBUSTIBLE IRRADIÉ



Le combustible irradié constitue lui-même une barrière efficace. La plus grande partie de la matière radioactive demeurerait bloquée dans les pastilles de combustible céramique qui sont très résistantes à la dissolution dans l'eau. Ces pastilles sont scellées dans des tubes métalliques résistants à la corrosion qui assurent une barrière supplémentaire contre l'échappement de la matière radioactive.



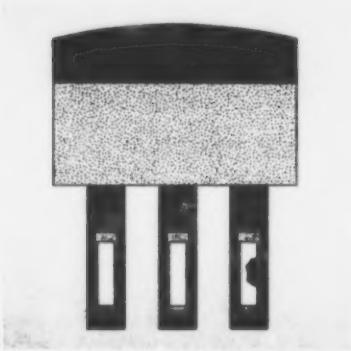
On a construit l'Installation d'Essais du Combustible Immobilisé (I.E.C.I.) dans le but d'étudier l'interaction des déchets radioactifs de combustible nucléaire, des barrières rocheuses naturelles et des matériaux retenus (candidats) pour la construction des barrières ouvragées dans une enceinte souterraine d'évacuation de déchets de combustible irradié. L'installation comprend 9 grands conteneurs en béton où se déroulent les essais sur les matières fortement radioactives et permet aux scientifiques d'étudier les effets de l'eau, de la chaleur, de la pression et du rayonnement sur les matériaux qu'on pourrait utiliser dans une enceinte d'évacuation.



état du combustible avant l'essai de lixiviation

état du combustible après exposition à l'eau à une température de 150°C et une pression de 10 MPa pendant un an. Les zones sombres sont celles influencées par la lixiviation aux joints de grains

L'irradiation du combustible produit un grand nombre d'éléments radioactifs ayant des propriétés chimiques différentes. La matière radioactive produite est (plus de 99%) en grande partie contenue dans la pastille de combustible céramique insoluble (UO_2). La petite fraction qui s'échappe de la pastille est contenue dans l'élément combustible, sur la face intérieure de la gaine du combustible ou dans les fissures des pastilles. Une libération rapide de cette matière suivrait la corrosion des conteneurs et de la gaine de combustible par les eaux souterraines. Étant donné que cette corrosion ne devrait pas se produire avant au moins 500 ans, la plus grande partie de la matière radioactive se serait, d'ici là, transformée en produits non radioactifs par désintégration.

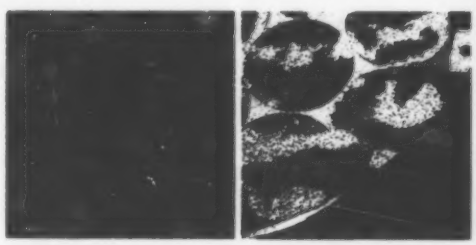


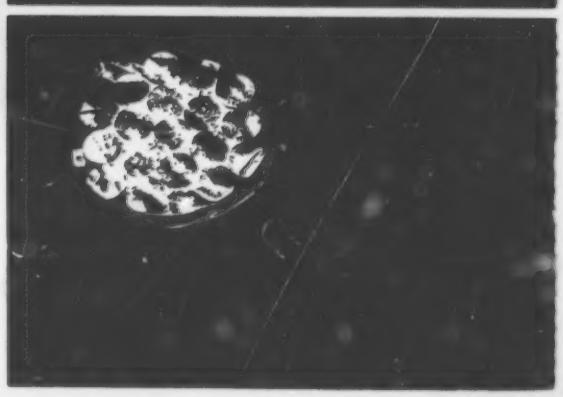
Conteneurs

Des conteneurs spéciaux résistants à la corrosion serviront de barrière supplémentaire entre le combustible irradié et l'environnement. Les résultats des essais effectués jusqu'à présent montrent que des conteneurs en titane ou en cuivre présenteraient les propriétés nécessaires pour résister à la corrosion et ainsi empêcher l'accès de l'eau souterraine pendant plusieurs centaines d'années. Dans le conteneur de référence, des perles de verre sont tassées autour des grappes de combustible irradié et dans les espaces entre le combustible et l'enveloppe du conteneur, pour assurer le support interne contre les pressions souterraines. Ces conteneurs sont conçus pour durer au moins 500 ans en présence du genre d'eau souterraine rencontrée dans le bouclier canadien.

Cette Installation d'Essais Hydrostatiques peut simuler les conditions de pression et de température qui pourraient exister dans une enceinte d'évacuation souterraine. On s'en sert pour l'évaluation de la résistance structurelle de différents types de conteneurs.

Des perles de verre tassées autour des grappes de combustible irradié à l'intérieur du conteneur assurent le support interne et empêchent ainsi la rupture des parois du conteneur sous la pression se produisant dans l'enceinte. D'autres matériaux de remplissage, tel que le plomb, ont été également considérés.

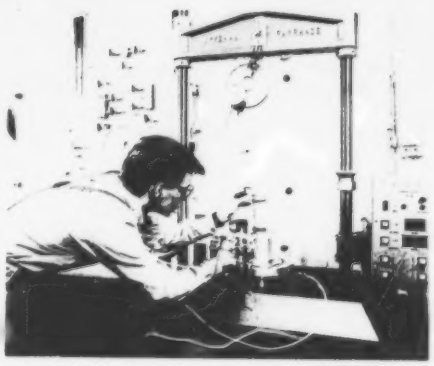




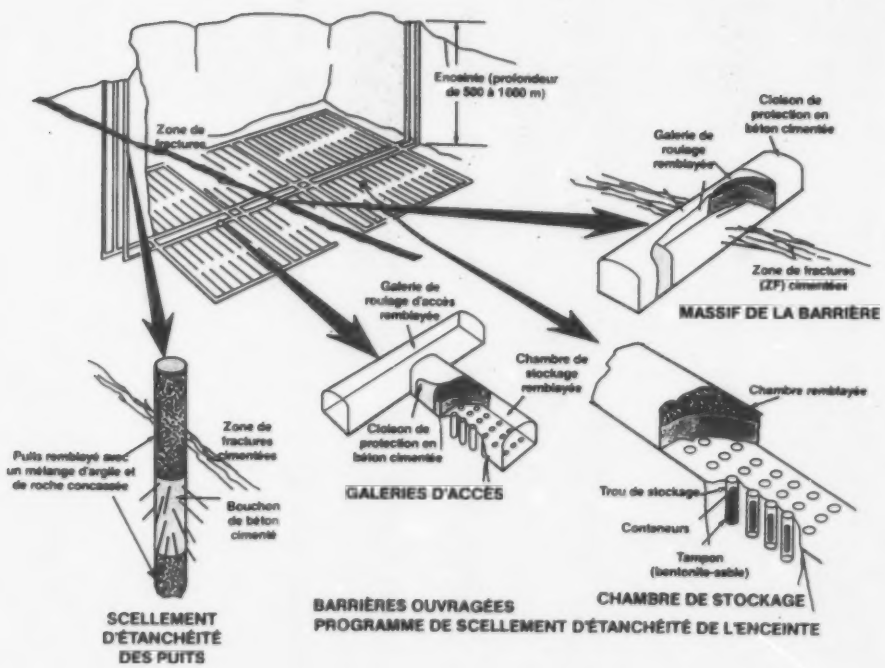
Ce prototype de conteneur pour combustible irradié a été éprouvé dans plusieurs conditions diverses. Il comporte une enveloppe en titane résistante à la corrosion. Les grappes de combustible irradié sont empilées dans des tubes en acier au carbone à l'intérieur du conteneur et les espaces entre ceux-ci sont remplis de perles de verre pour assurer le support interne. Différents types de conteneurs ont été éprouvés. Le conteneur de référence est de forme cylindrique et contiendra 72 grappes de combustible irradié.

Scellement d'étanchéité de l'enceinte

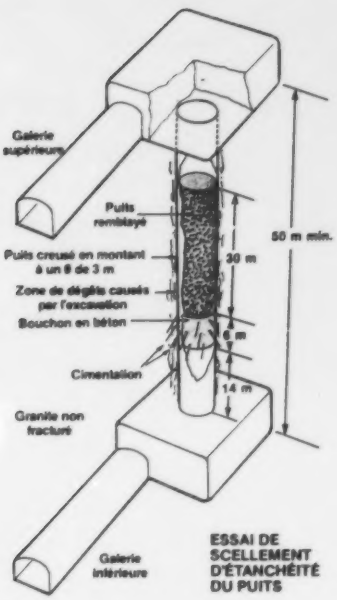
Des matériaux spéciaux, compactés autour des conteneurs de combustible irradié, vont ralentir davantage la migration de la matière radioactive. La recherche montre qu'un mélange spécial de matériaux de scellement d'étanchéité à base d'argile et de sable, compacté autour des conteneurs, peut limiter l'écoulement des eaux souterraines et retenir la matière radioactive qui s'échappe. Au contact de l'eau, l'argile gonflerait et assurerait l'étanchéité autour des conteneurs. Si l'eau souterraine finissait par pénétrer et provoquait la corrosion du conteneur, l'argile diminuerait la vitesse de migration des particules de déchets dissoutes. Les chambres et les galeries de l'enceinte d'évacuation seraient remblayées avec un mélange semblable d'argile, de sable et de roche concassée. Toutes les fractures importantes de la roche réceptrice seraient cimentées avec de l'argile ou du ciment; les puits et les trous de forage seraient scellés de la même façon. Le scellement d'étanchéité des puits et des conteneurs fera l'objet d'essais en vraie grandeur au Laboratoire de Recherches Souterrain (LRS).



On utilise cette machine à compression triaxiale pour déterminer la résistance des matériaux de scellement d'étanchéité et de remblayage.

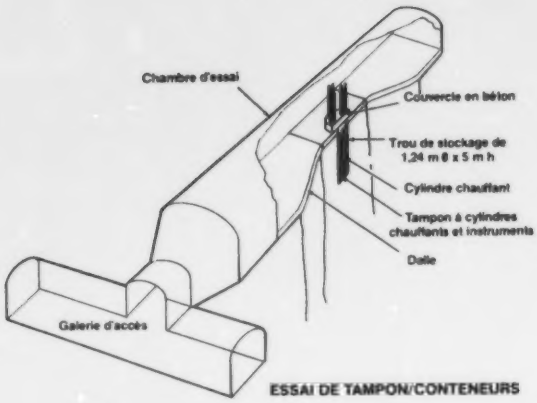


Cette figure illustre les stratégies de scellement d'étanchéité qu'on doit employer dans l'enceinte. On effectue des recherches en laboratoire et des essais à grande échelle au LRS pour valider l'efficacité des systèmes de scellement d'étanchéité.



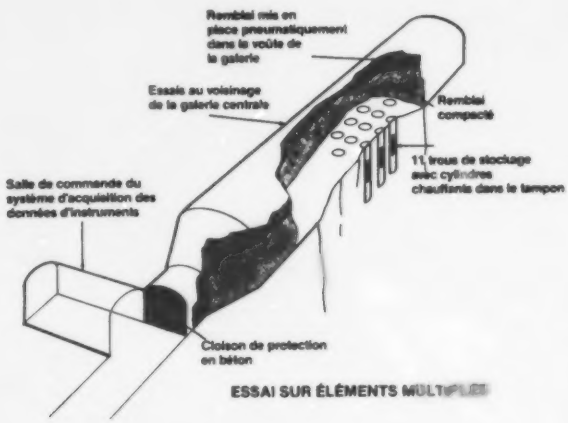
ESSAI DE SCELLEMENT D'ÉTANCHÉITÉ DU PUITS

L'essai de scellement d'étanchéité du puits permettra d'étudier la capacité de scellement d'étanchéité des puits qu'ont les bouchons en béton et les remblais à base d'argile.



ESSAI DE TAMPON/CONTENEURS

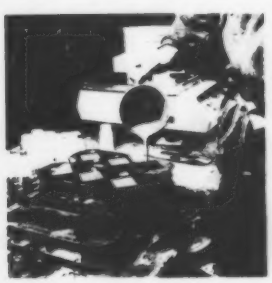
Lors de l'essai ci-dessus, un cylindre chauffant est placé dans un mélange de sable et de bentonite compacté pour évaluer la réaction des matériaux de scellement d'étanchéité et de la roche à la chaleur.



ESSAI SUR ÉLÉMENTS MULTIPLES

Lors de cet essai sur éléments multiples, un réseau de cylindres chauffants sera installé dans des trous de stockage forés dans le sol d'une chambre du LRS. La chambre sera remblayée et l'effet de la chaleur sur le comportement du remblai sera étudié.

À l'aide de la tomographie électromagnétique, on prend un cliché de la masse rocheuse avant et après la cimentation pour savoir à quels endroits le coulis a pénétré.



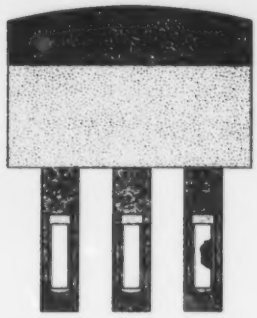
Contrôle de la qualité du coulis.

Ce capteur d'émission acoustique a servi à localiser à distance la pénétration du coulis lors des essais de cimentation.

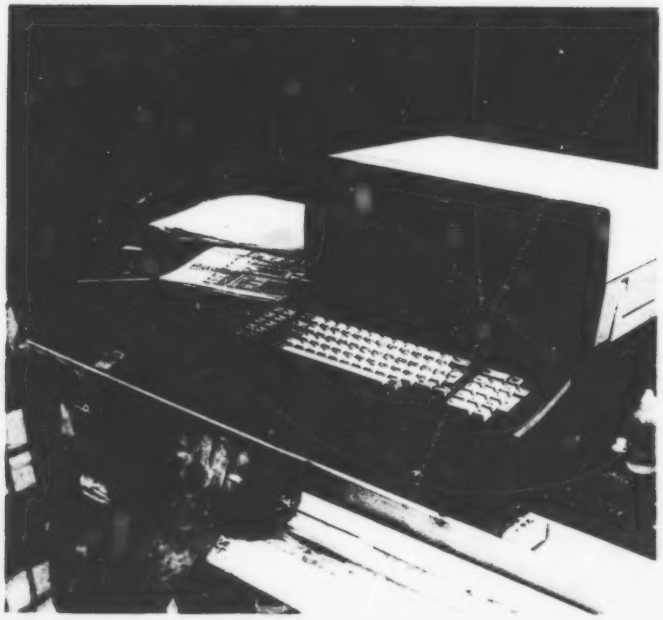
BARRIÈRE NATURELLE
Roche réceptrice

4e barrière ROCHE RÉCEPTRICE

La roche elle-même servirait de barrière supplémentaire du fait que l'enceinte d'évacuation serait construite dans la roche granitique stable où l'écoulement d'eaux souterraines est faible. Les réactions chimiques entre la roche et les déchets dissouts empêcheraient la migration de la matière radioactive.



Des travaux de photogrammétrie de surface, recherches hydrogéologiques et travaux de forage poussés ont été effectués dans ces aires de recherches du bouclier canadien pour obtenir des renseignements sur les caractéristiques de la roche et l'écoulement des eaux souterraines.



On peut évaluer le degré de fracturation de la roche granitique en examinant des échantillons carottés provenant de différents sites de forage du bouclier canadien.

On rassemble des renseignements sur la manière dont les particules radioactives, qui se sont dissoutes dans les eaux souterraines, adhéreraient aux surfaces des fractures de la roche.

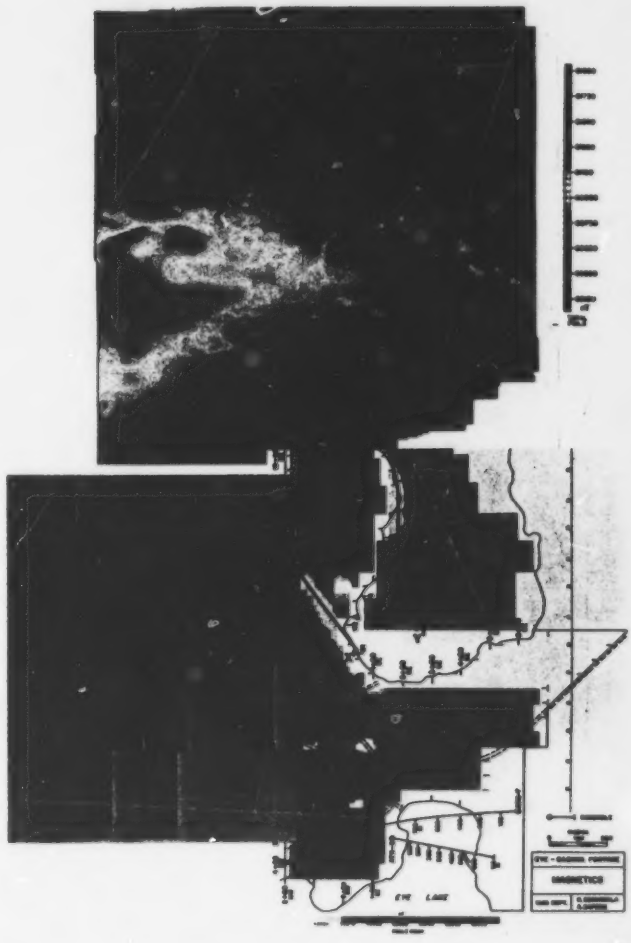
Recherche géoscientifique

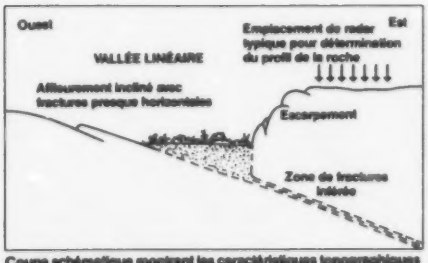
Avant de choisir un site d'évacuation sûr dans la roche granitique, on doit comprendre à fond les propriétés de la roche, la façon dont les eaux souterraines s'écoulent dans la roche ainsi que la façon dont la roche, les eaux souterraines et le combustible irradié pourraient réagir les uns sur les autres. On a effectué des essais pour déterminer les propriétés chimiques, physiques et mécaniques de la roche, les propriétés physiques et chimiques de l'eau souterraine, la nature des interactions des eaux souterraines, de la roche et des radionucléides, l'écoulement des eaux souterraines dans la masse rocheuse et les contraintes thermiques provoquées par le transfert de la chaleur du combustible à la roche ainsi que les contraintes mécaniques provoquées par les excavations pratiquées dans la masse rocheuse.

La photogrammétrie détaillée de surface des études géophysiques, des travaux de forage d'exploration à grande profondeur et des études hydrogéologiques ont été effectués dans plusieurs aires de recherches du bouclier canadien. On a construit un Laboratoire de Recherches Souterrain, appelé le LRS, près de l'Établissement de recherches nucléaires de Whiteshell au Manitoba et une étude hydrogéologique de la région environnante est en cours pour mieux comprendre l'écoulement des eaux souterraines sur une grande échelle. On a mis au point une technique qui permet aux scientifiques de déterminer les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de masses rocheuses jusqu'à une profondeur de 1000 à 1200 m.

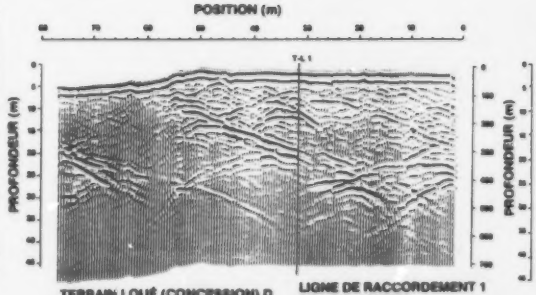
Cette méthode de caractérisation et d'évaluation des sites est utile pour les formations de roche granitique qui affleurent, comme c'est le cas dans le bouclier canadien, ou pour celles qui sont couvertes d'une couche de sol ou d'autres types de roches. Les recherches menées dans le bouclier indiquent que de nombreuses formations rocheuses peuvent convenir à l'évacuation du combustible nucléaire.

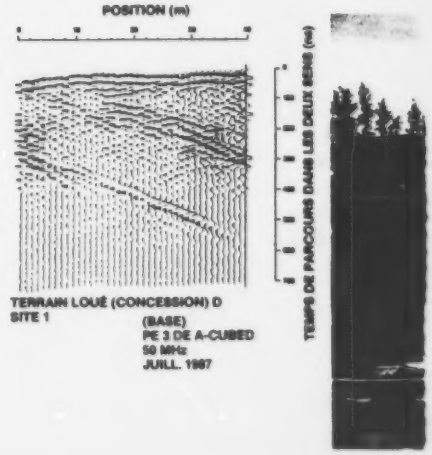
Les scientifiques peuvent se livrer à des études approfondies pour la caractérisation de sites afin de savoir si un site convient à une installation d'évacuation. Les études pour la reconnaissance géologique comportent des levés aéromagnétiques, la cartographie de la structure géologique, la lithologie ainsi que des levés au sonar de fond de lacs pour établir les conditions exactes existant à la surface et près de la surface. Elles sont suivies du forage à grande profondeur et d'études hydrogéologiques pour mieux connaître la structure souterraine.



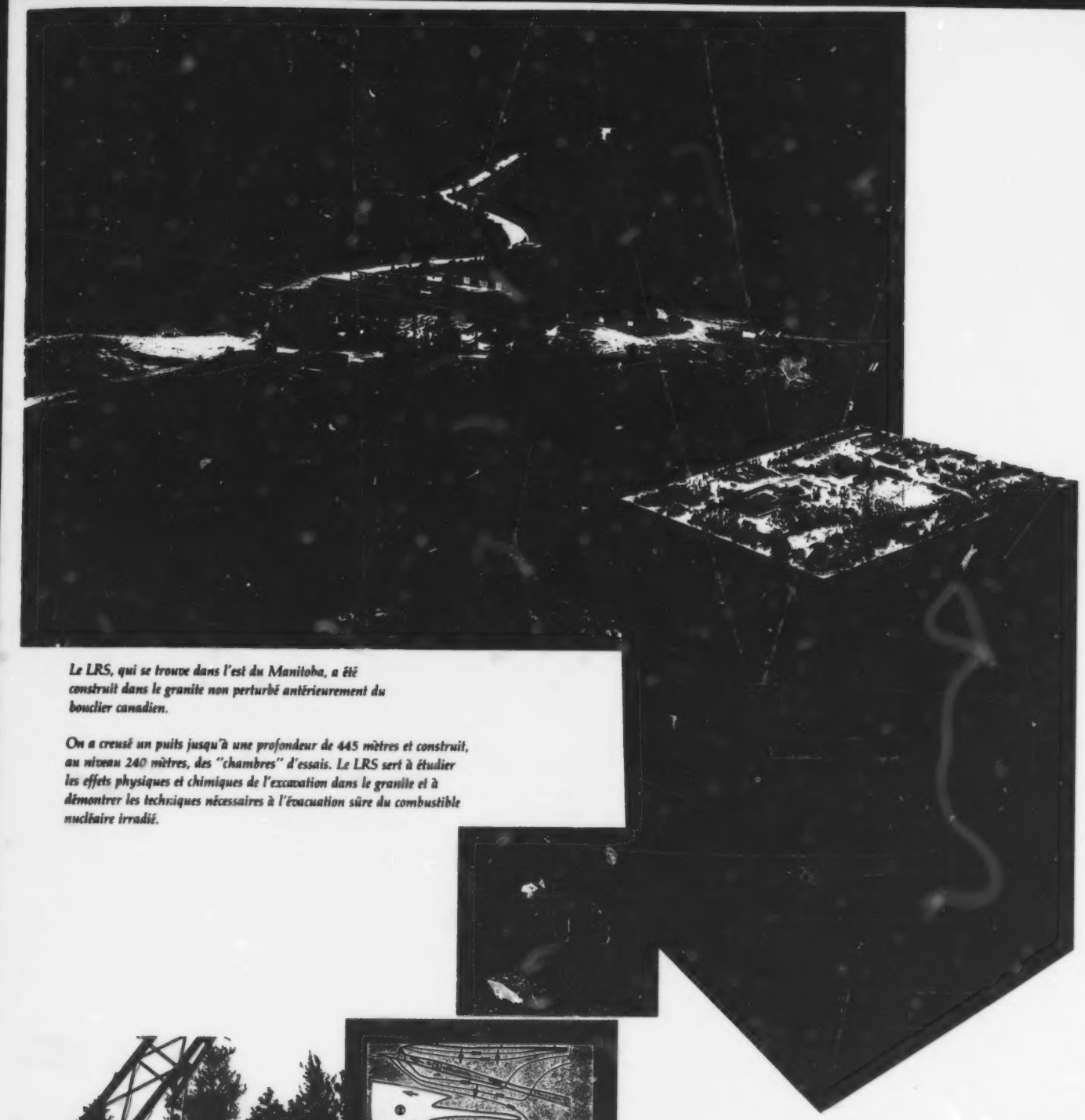


Coupe schématique montrant les caractéristiques topographiques et des fractures des vallées curvilignes.



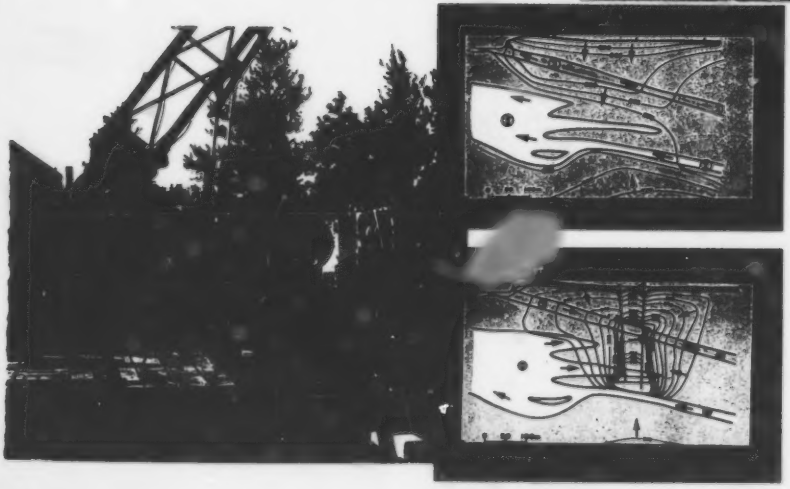


Les fractures souterraines dans le granite peuvent être décelées par radar à partir de la surface. De telles études permettent d'obtenir des renseignements sur les caractéristiques de la masse rocheuse que l'on pourrait envisager pour le site d'évacuation. L'orientation de la zone de fractures est indiquée par les zones sombres des tracés de radar et peut être vérifiée par forage.



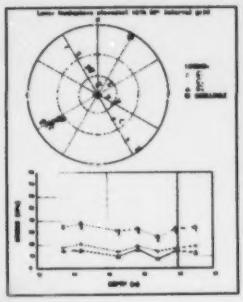
Le LRS, qui se trouve dans l'est du Manitoba, a été construit dans le granite non perturbé antérieurement du bouclier canadien.

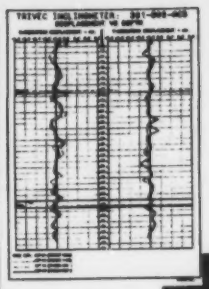
On a creusé un puits jusqu'à une profondeur de 445 mètres et construit, au niveau 240 mètres, des "chambres" d'essais. Le LRS sert à étudier les effets physiques et chimiques de l'excavation dans le granite et à démontrer les techniques nécessaires à l'évacuation sûre du combustible nucléaire irradié.

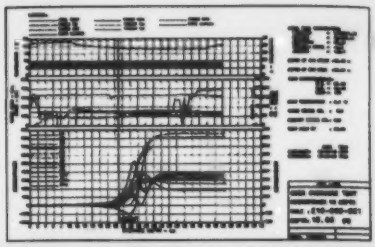


Des essais et mesures hydrogéologiques ont été effectués dans des trous de forage, jusqu'à une profondeur de 1200 m, dans des aires de recherches choisies du bouclier canadien. Le milieu d'eaux souterraines du LRS, avant l'excavation des puits (ci-dessus) et après leur excavation (ci-dessous), montrent comment l'écoulement des eaux souterraines dans la roche est influencé par l'excavation de ces puits.

Cette jauge de déformation installée à grande profondeur dans un trou de forage permet aux scientifiques de mesurer les contraintes dans la roche à une profondeur allant jusqu'à 1000 mètres.







Ces tracés montrent (a) l'intensité et l'orientation de 7 contraintes de surcarottage mesurées consécutivement, (b) les résultats d'un essai de surcarottage et (c) les données sur le degré de déplacement de la roche par l'excavation.

Les données rassemblées au cours des études menées au LRS servent à construire un modèle de calcul représentant le système de roche naturel. Les renseignements sont finalement utilisés dans un modèle de calcul plus grand pour prédire la faisabilité et la sûreté à long terme de l'enfouissement du combustible nucléaire irradié.

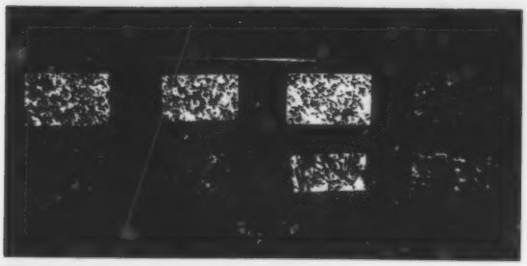
L'excavation des puits du LRS à travers des zones de fractures aquifères a apporté des renseignements précieux.

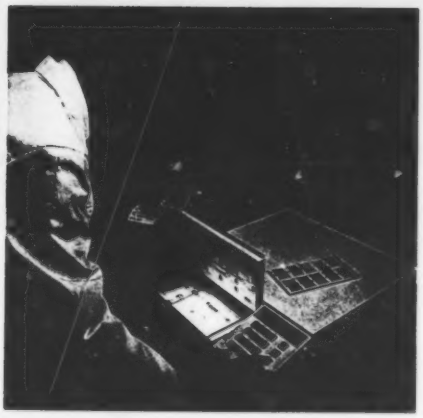
(Ci-dessous) Cet appareil mesure, à un emplacement de fracture, la pression hydraulique et le déplacement de la roche associés dans un trou de forage. Il permet aux scientifiques de connaître davantage le comportement des systèmes de roche et des réseaux d'eaux souterraines sous contraintes.

(Ci-dessous) Au LRS, on utilise une cellule de déformation triaxiale, qu'on surveille continuellement, pour mesurer les contraintes dans la roche.

(Ci-dessus) Échantillonnage géochimique de l'eau souterraine au LRS en vue de déterminer la composition de celle-ci à grande profondeur.

(Ci-dessus) Études de sorption des matières radioactives effectuées sous azote.





Un densitomètre à laser et un enregistreur à intégration sont utilisés pour mesurer quelle quantité d'une matière radioactive quelconque pourrait s'échapper du combustible irradié enfoui et sorber sur la roche.

(À droite) On se sert du spectromètre à infrarouge le plus moderne pour mieux comprendre la sorption de la matière radioactive sur différents minéraux de la roche.

(Ci-dessus) On effectue des essais en laboratoire sur des échantillons de roche pour en déterminer la porosité.

Installation d'Essais de Migration de Radionucléides sur Grands Blocs.

Ce grand bloc de granite est à l'étude en laboratoire pour déterminer la façon dont la matière radioactive traverse les fractures de la roche. On utilise différents traceurs, dont des colorants, pour savoir comment l'eau s'écoule à travers la fracture.

Recherche sur l'environnement

On a effectué des recherches sur l'environnement en vue de mieux comprendre les processus de la biosphère et ainsi comprendre la migration de la matière radioactive dans l'environnement de surface. Ces recherches fournissent des renseignements qui serviront à la conception de modèles et de programmes de calcul pour déterminer l'impact d'une installation d'évacuation sur l'environnement.

Le programme de recherches sur l'environnement porte sur quatre éléments principaux: les voies de transfert par l'eau, le sol, l'atmosphère et les chaînes alimentaires.

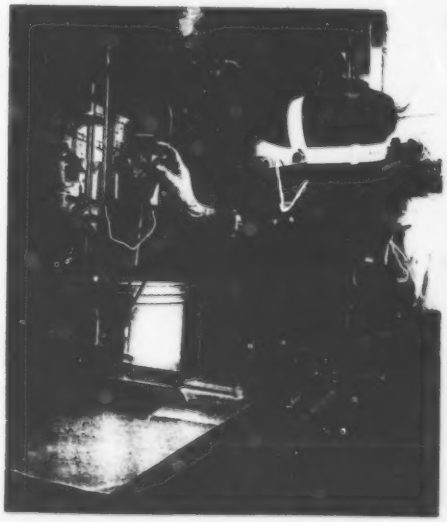
Les recherches sur la voie de transfert par l'eau comprennent l'étude du comportement de la matière radioactive pénétrant dans les eaux de surface par les eaux souterraines, et du partage ultérieur des matières radioactives entre l'eau et les sédiments. Les recherches sur la voie de transfert par le sol englobent les études du comportement des radionucléides dans le sol forestier, cultivé et marécageux. Les recherches sur la voie de transfert par l'atmosphère sont concentrées sur les processus pouvant mettre en suspension, faire migrer et faire retomber les matières radioactives sur les plans local et régional. Les recherches sur la voie de transfert par les chaînes alimentaires sont concentrées sur le transfert des matières radioactives aux plantes, aux animaux et à l'être humain.

Les données provenant de ces essais ont servi à construire un modèle de calcul de la migration des matières radioactives jusqu'à l'être humain par les chaînes alimentaires, dont les éléments naturel et agricole. Toutes ces études doivent permettre de faire des calculs fiables de l'impact de l'évacuation du combustible irradié sur l'être humain et l'environnement.

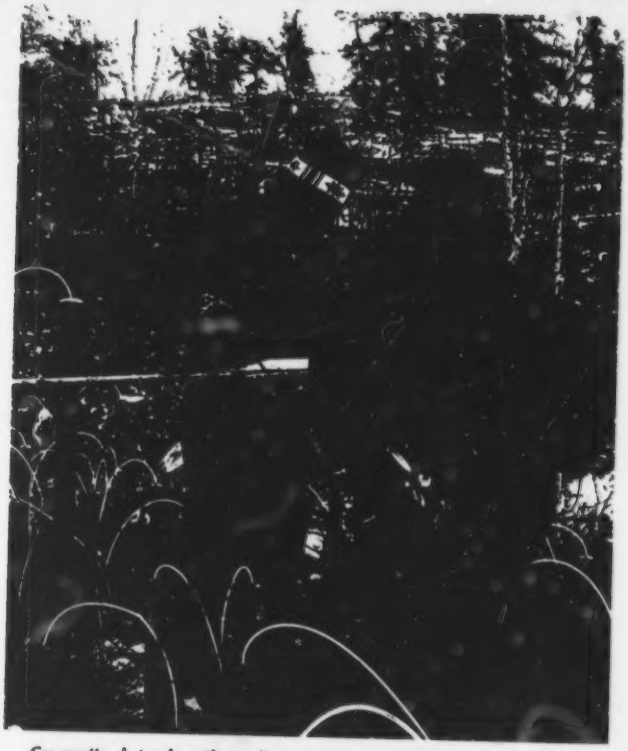
Ce ballon-sonde muni d'un émetteur radio fournit aux météorologues des données sur les conditions atmosphériques. Ces données servent à mettre au point et à vérifier des modèles décrivant la suspension et la migration des radionucléides dans l'air et leur retombée en un autre lieu.

On prélève des carottes de sol pour étudier la migration des matières radioactives vers le bas par lixiviation et vers le haut par action capillaire (capillarité).

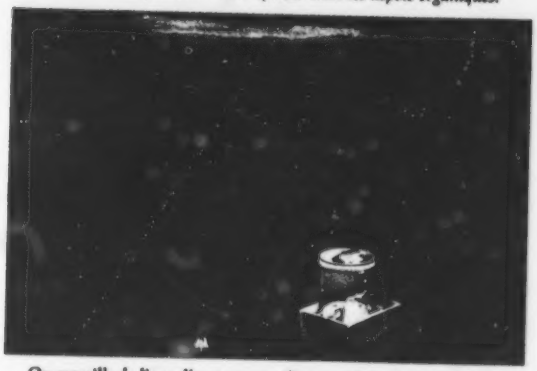
Cet appareil sert à extraire des carbonates à carbone 14 des sols utilisés lors d'un essai d'absorption du carbone 14 par les plantes.



Étant donné que la plupart des décharges d'eaux souterraines qu'on trouve à grande profondeur, se feront vers les nappes et cours d'eau, on cartographie les lacs pour en déterminer le volume à des fins de modélisation.

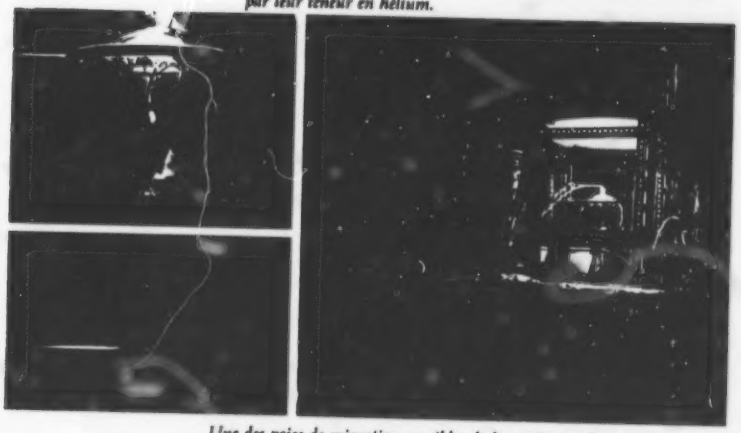


Ces carottes de tourbe prélevées d'un marécage à sphaigne permettent d'obtenir les coefficients de distribution de l'iode dans le sol en vue de savoir comment les radionucléides pourraient se disperser dans les dépôts organiques.



On recueille de l'eau d'une source saline pour l'analyser quant aux gaz dissous. Puisque les eaux souterraines qu'on trouve à grande profondeur dans le bouclier canadien, ont habituellement une forte concentration d'hélium, on peut en localiser les points de décharge par leur teneur en hélium.

Dans cet essai, on étudie l'absorption, par les plantes, des radionucléides provenant des eaux souterraines contaminées.



Une des voies de migration possibles de la matière radioactive est l'absorption par les plantes et l'émission dans l'atmosphère. Lors de cet essai, on étudie la migration de l'iode radioactif par les feuilles de plants d'haricots.

Ingénierie de l'installation d'évacuation

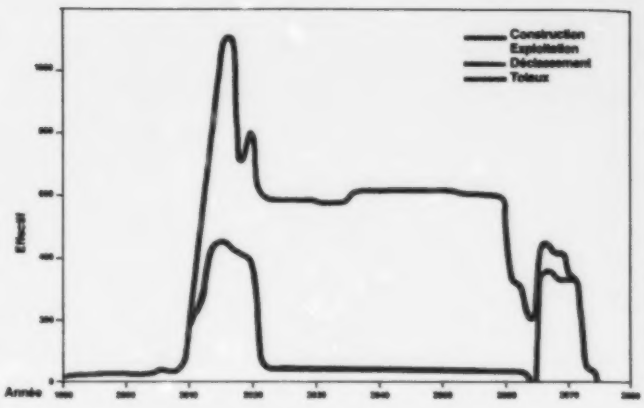
Des études techniques approfondies ont démontré que le concept de base de la construction et de l'exploitation d'une enceinte d'évacuation de combustible nucléaire irradié, est réalisable et qu'on peut le développer à l'aide des techniques actuelles.

Une étude de conception technique a été effectuée pour examiner comment une enceinte d'évacuation pourrait être construite et exploitée et avoir une meilleure idée du temps de construction, du coût et de la main-d'oeuvre entraînés Les études permanentes permettront d'améliorer les éléments de la conception tels que les avantages relatifs d'autres techniques d'excavation possibles, d'autres matériaux pour conteneurs, d'autres techniques de stockage et mise en place et d'autres techniques de scellement d'étanchéité de l'enceinte.

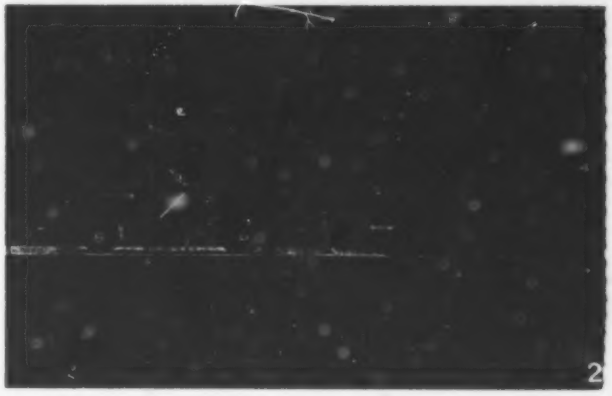
Une installation d'évacuation complète se compose d'une aire de réception du combustible, d'un poste d'immobilisation où le combustible est mis dans des conteneurs résistants et d'une enceinte souterraine constituée de puits, de galeries et de chambres d'évacuation (stockage). La manutention du combustible nucléaire irradié conditionné (emballé) se ferait à des postes blindés et il serait transporté dans des châteaux de transport blindés, eux-aussi, pour protéger les travailleurs du rayonnement. Une fois que les conteneurs seraient mis en place dans les chambres d'évacuation, la roche et le matériau de scellement d'étanchéité assureraient un blindage suffisant.

La conception, la construction, l'exploitation, la fermeture et le déclassement d'une enceinte d'évacuation constitueraient un projet industriel important. Le coût total de ce projet serait d'environ 9 milliards de $, étalé sur une période de quelque 70 ans, pour 191 000 tonnes de combustible irradié, quantité dont la production est prévue au Canada avant 2035. Ces chiffres pourraient changer selon la quantité effectivement produite et le calendrier réel des travaux de construction. En ce moment, les compagnies d'électricité provinciales amassent des fonds en vue de l'évacuation. On estime que le coût de l'évacuation se chiffrera à moins de 1 pour-cent du prix de l'électricité que paie le consommateur canadien.

La phase de construction de l'installation, qui serait de 10 ans, demanderait un effectif d'environ 1 100 personnes. Durant la période d'exploitation de 40 ans, au cours de laquelle les déchets seraient stockés dans l'enceinte, il faufrait un effectif à temps plein d'environ 600. Avant et pendant la construction et l'exploitation, on installerait des instruments de surveillance à l'intérieur de l'enceinte d'évacuation et autour de celle-ci. Les mesures (lectures) provenant de ces instruments permettraient l'exploitation sûre de l'installation et la surveillance du comportement de l'enceinte d'évacuation au cours d'une certaine période. On pourrait recueillir et évaluer ces renseignements aussi longtemps qu'il le faudrait.

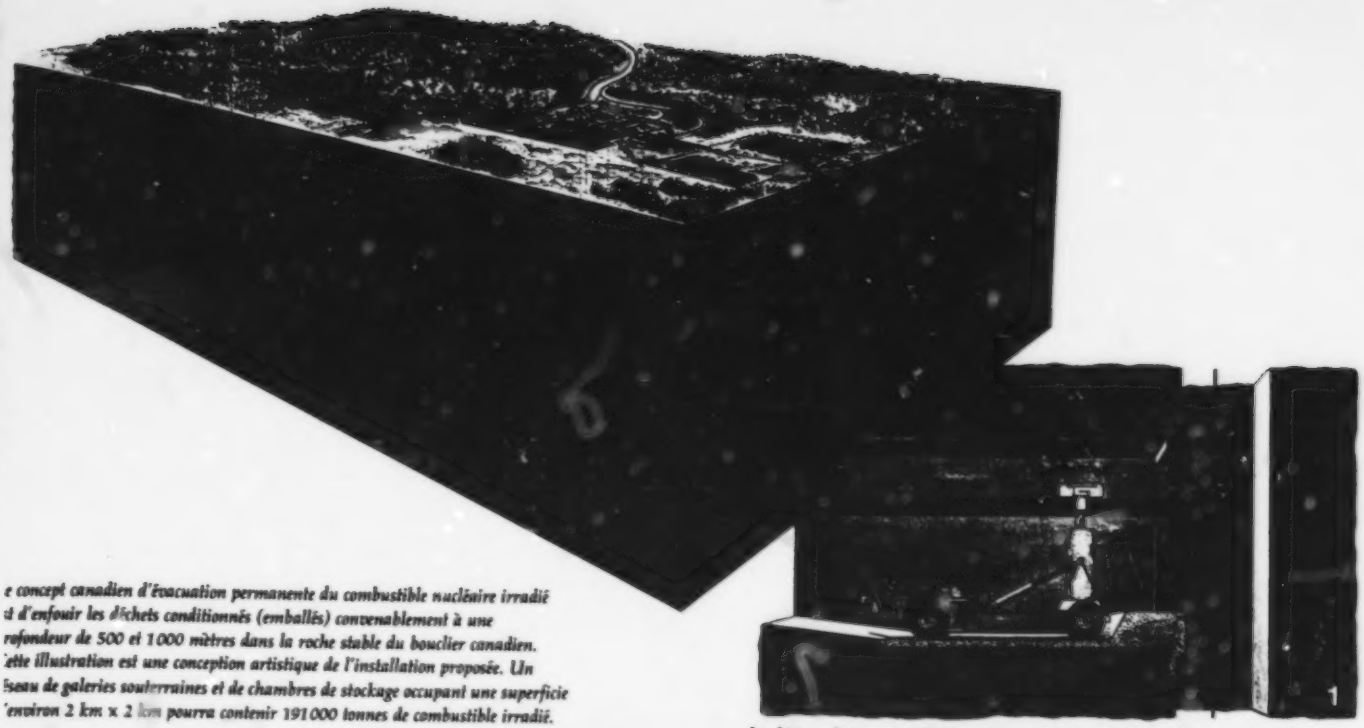


La conception, la construction, l'exploitation et la fermeture d'une installation d'évacuation donneront lieu à la création de nombreux emplois. À son point culminant, le site emploiera plus de 1 100 personnes. La phase d'exploitation de 40 ans nécessitera l'emploi d'environ 600 personnes à temps plein.



On fait tourner le château de transport blindé puis on le fixe en position inclinée sur le camion de transport en vue d'assurer une meilleure stabilité et de réduire la hauteur libre du camion chargé. Le conteneur est transporté à l'entrée de la chambre de stockage où il est transféré sur la plate-forme de mise en place des conteneurs qui est en attente.

6 Une fois que tous les trous de stockage disponibles ont été remplis de conteneurs de déchets et de tampon, la première phase du remblayage des chambres commence. Des véhicules surbaissés, modifiés spécialement pour les travaux souterrains, effectuent des travaux généralement semblables aux travaux de construction de routes. Un remblai préparé spécialement (25 pour-cent en poids d'argile de lac et 75 pour-cent en poids de granite concassé, teneur en eau d'environ 9 pour-cent) est transporté jusqu'à la chambre dans des camions-bétonnières; on le répartit dans les chambres à l'aide de chargeurs à benne frontale, on le nivelle à l'aide de niveleuses automotrices (bouteurs) et on le comprime en couches superposées à l'aide de rouleaux compresseurs. Le travail est terminé quand le niveau de remblai arrive à environ 2 mètres du plafond de la chambre.

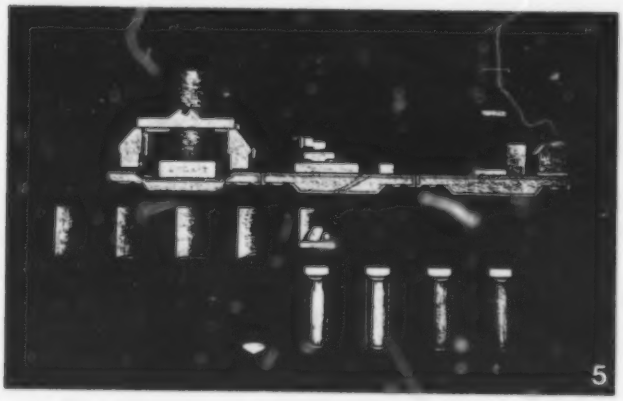


e concept canadien d'évacuation permanente du combustible nucléaire irradié st d'enfouir les déchets conditionnés (emballés) convenablement à une rofondeur de 500 et 1 000 mètres dans la roche stable du bouclier canadien. 'cette illustration est une conception artistique de l'installation proposée. Un seau de galeries souterraines et de chambres de stockage occupant une superficie 'environ 2 km x 2 km pourra contenir 191 000 tonnes de combustible irradié.

Le château de transport blindé renfermant les conteneurs de combustible irradié, est transféré de la cage de puits de transport des déchets à un camion de transport qui est en attente.

On fore des trous dans le sol des chambres de stockage pour la mise en place du matériau de scellement d'étanchéité et le stockage des conteneurs.

On fore un trou dans le matériau de scellement d'étanchéité (argile et sable) précompacté pour y placer le conteneur. Le conteneur est descendu du château de transport blindé jusque dans le trou.



On utilise du sable de silice sec pour remplir les espaces entre le matériau de scellement d'étanchéité et le conteneur avant d'ajouter la couche supérieure de matériau de scellement d'étanchéité. Le conteneur est maintenant suffisamment protégé et le personnel peut circuler dans la chambre.

7 Le remblai supérieur a la même composition et par conséquent les mêmes propriétés de gonflement que le matériau de scellement d'étanchéité des trous de stockage. En raison de la limitation de hauteur de la chambre de stockage, ce remblai doit être mis en place par projection. Une fois le remblayage terminé, la chambre est fermée hermétiquement par une cloison de protection en béton massif qui est cimentée par contact à la roche. Le contenu de la chambre est maintenant suffisamment protégé. S'il fallait, un jour, récupérer les conteneurs, on pourrait retirer les cloisons de protection et le remblai et manipuler les conteneurs à l'aide d'un appareillage conçu spécialement.

Transport

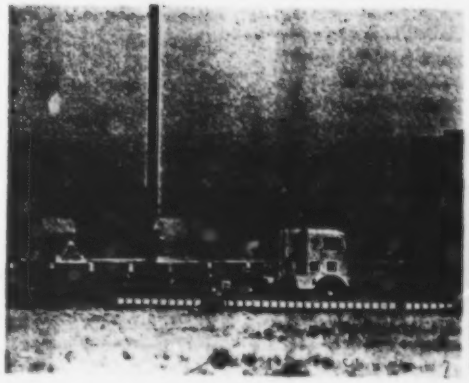
On transportera le combustible nucléaire irradié des sites de stockage des centrales au site d'évacuation futur dans des châteaux de transport spéciaux conçus pour résister à des accidents graves. D'épais rideaux métalliques protègent le chauffeur du camion et tout autre personne contre le rayonnement.

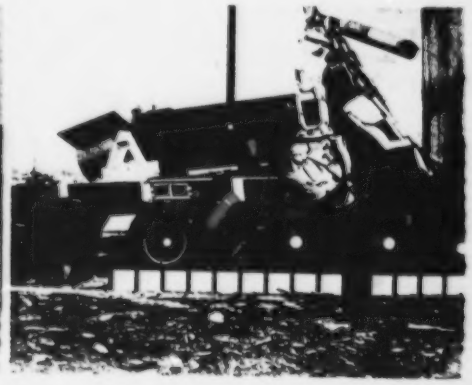
La réglementation canadienne pour de tels châteaux de transport est fondée sur les normes établies par l'Agence internationale de l'énergie atomique. Des châteaux fabriqués selon ces normes sont déjà utilisés dans le monde et aucun accident entraînant l'irradiation d'une personne du public n'est survenu. En Grande-Bretagne et aux É.-U., de tels châteaux ont été soumis à des essais de collision réelle avec des camions et des trains se déplaçant à des vitesses supérieures à 120 kilomètres à l'heure. Bien que les locomotives aient été détruites, la capacité des châteaux de confiner le contenu n'a pas été compromise.

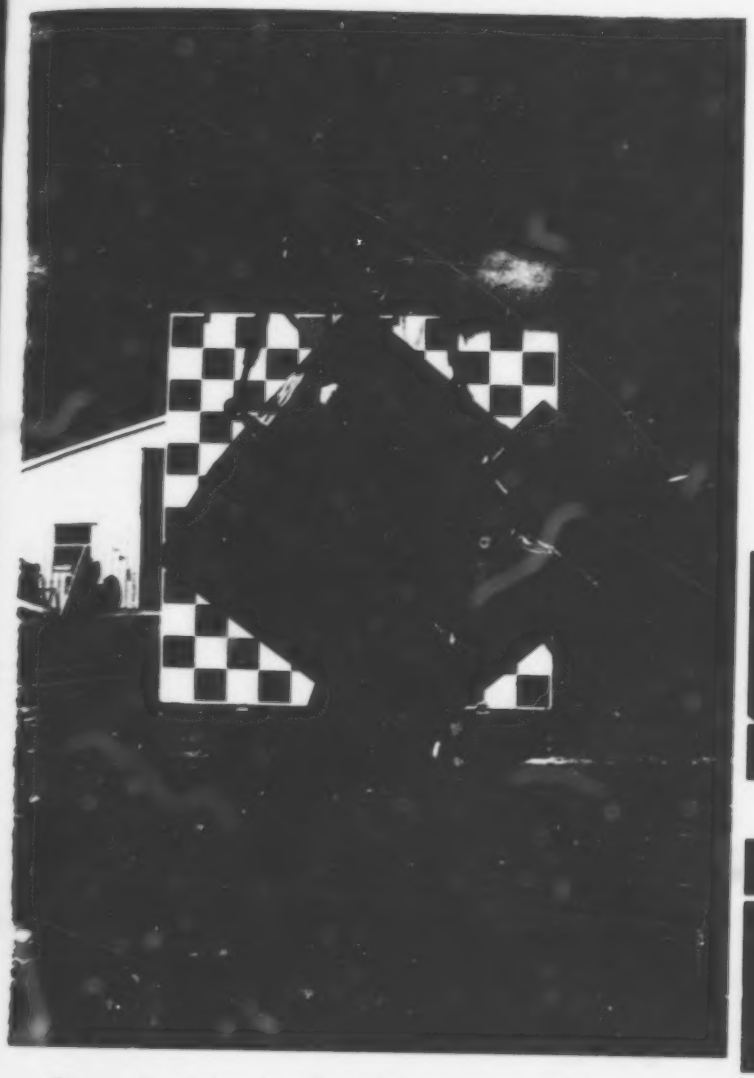
Le chauffeur du véhicule de transport pourrait, bien entendu, être blessé lors d'accidents courants de la circulation. D'après des statistiques sur les accidents de transport d'autres matières, on prévoit que le risque est de l'ordre de 0,1 à 0,8 accident mortel par an pendant toute la durée de l'exploitation, en fonction du mode de transport utilisé et de la distance par rapport à l'installation d'évacuation.

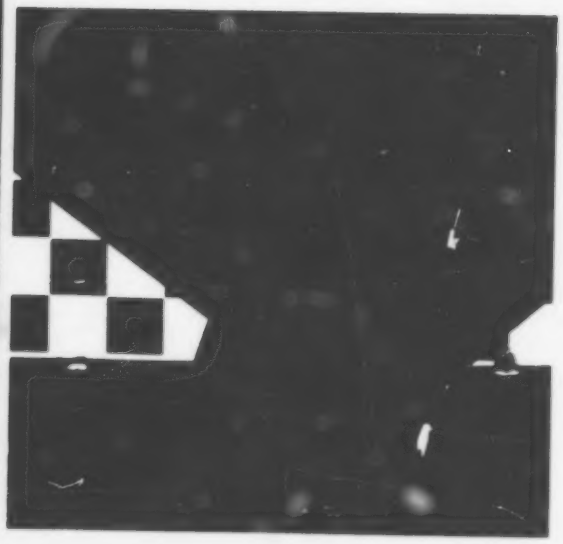
Un château de transport spécial a été conçu et fabriqué par Ontario Hydro. Il n'a été autorisé qu'après avoir subi une série d'essais démontrant qu'il résisterait à des accidents graves.

Les châteaux de transport utilisés actuellement sont conçus pour résister à des accidents graves. Sur les photos de droite, des essais menés aux Sandia National Laboratories aux É.-U. montrent un château intact (extrême droite) auquel on a fait subir un essai de collision avec une locomotive. Sur les deux photos de droite immédiate, on voit un château qui a percuté un mur de béton sans se rompre.

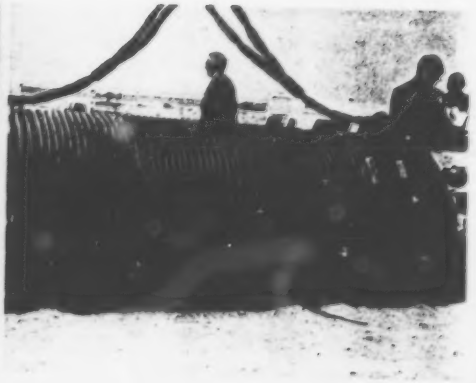








Cette maquette en demi-grandeur réelle du château de transport de combustible irradié a été soumise à une batterie d'essais rigoureux, dont une chute de 9 mètres sur une surface dure, une exposition de 30 minutes à un incendie de pétrole à 800° C et une immersion dans l'eau pendant 8 heures. À l'appui des résultats des essais, la Commission de contrôle de l'énergie atomique a approuvé l'utilisation du château pour le transport routier du combustible irradié au Canada.



Évaluations de l'environnement et de la sûreté

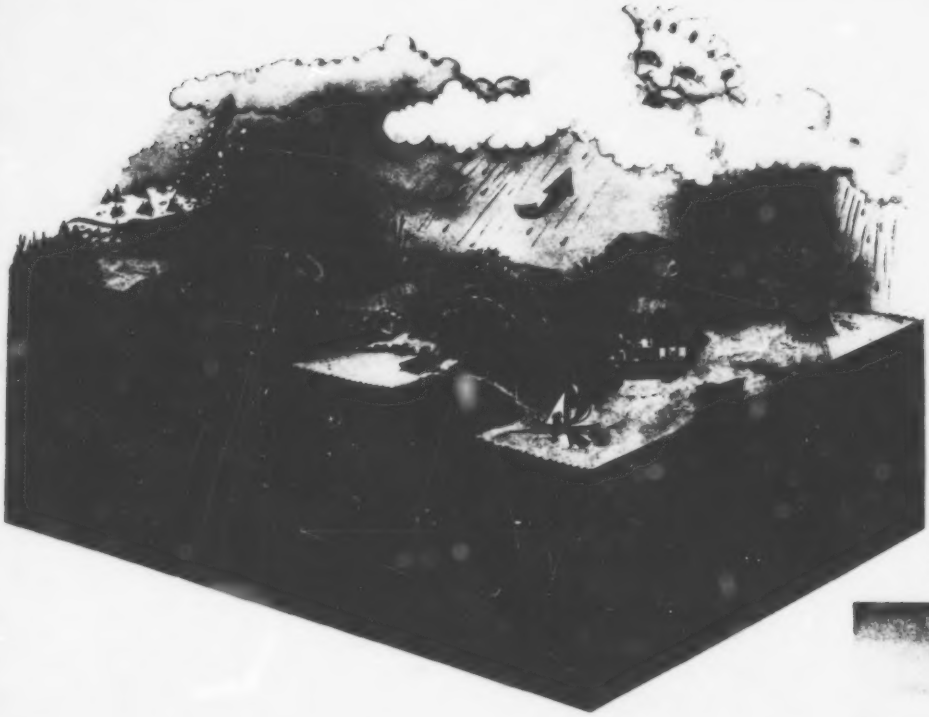
Un objectif important du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire est l'évaluation des conséquences éventuelles du transport, du stockage, de l'immobilisation et de l'évacuation du combustible nucléaire irradié pour l'être humain et l'environnement. Le transport et le stockage sont soumis à l'autorisation au Canada. On a effectué deux évaluations provisoires qui ont permis de vérifier les méthodes et de calculer les effets possibles d'une enceinte d'évacuation. Elles ont été soumises aux organismes de réglementation et mises à la disposition du public pour remarques en 1981 et 1985. On a recueilli et documenté les remarques reçues sur la première évaluation provisoire. Les remarques des organismes de réglementation et des ministères de l'environnement sur la deuxième évaluation ont été coordonnées par la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA). On a tenu compte des remarques lors du développement de l'évaluation générique définitive en cours. Ces évaluations provisoires ont indiqué qu'une enceinte d'évacuation construite, à grande profondeur, dans la roche granitique du bouclier canadien, ne devrait libérer aucune quantité importante de matières radioactives. On prévoit que les doses que recevraient les personnes exposées du public représenteraient une petite fraction de celles qu'elles reçoivent du rayonnement ionisant naturel. Les risques pour la santé d'une installation d'évacuation bien conçue devraient se situer bien en-deçà des limites des objectifs et directives réglementaires proposés par la CCEA.

La méthode d'évaluation des conséquences écologiques, économiques et sociales de la construction et de l'exploitation d'installations nucléaires pour l'environnement, est bien établie. On l'emploie actuellement pour l'évaluation d'une installation d'évacuation de déchets nucléaires lors de la phase avant fermeture. Les facteurs qu'on doit prendre en considération comprennent l'utilisation des ressources naturelles, les garanties et la sûreté nucléaires, la sécurité des travailleurs et du public, les voies de transfert des faibles quantités de matières radioactives libérées au cours de l'exploitation et l'effet de celles-ci sur l'environnement. Les conséquences du transport du combustible irradié jusqu'au site d'évacuation, de la construction de l'enceinte, de l'exploitation des installations d'immobilisation et d'évacuation et du scellement d'étanchéité de l'enceinte d'évacuation, ont été évaluées.

L'exploitation de toute installation nucléaire peut conduire à certains rejets dans l'environnement. L'installation d'évacuation est conçue pour qu'elle soit conforme à tous les réglements actuels touchant les conséquences radiologiques et non radiologiques pour l'environnement. On tiendrait compte, dans la conception, la construction, l'exploitation, la fermeture et le déclassement de toute enceinte réelle d'évacuation de combustible nucléaire irradié, des réglements sur l'environnement qui sont en vigueur au moment où l'on soumet la demande de permis.

Après le scellement d'étanchéité de l'enceinte, la corrosion éventuelle des conteneurs de combustible irradié et la dissolution de faibles quantités de matières radioactives qui pourraient migrer jusqu'à la surface du sol, prendraient des milliers d'années. Il est impossible de démontrer physiquement le degré d'efficacité de fonctionnement d'un tel système d'évacuation au cours d'une aussi longue période. Toutefois, on a évalué sa sûreté à long terme en étudiant le comportement du combustible, des conteneurs, des matériaux de scellement d'étanchéité, de la masse rocheuse et de l'environnement de surface. Les évaluations sont fondées sur la compréhension profonde des processus physiques, chimiques, géologiques et radiologiques fondamentaux de l'évacuation géologique et ont été vérifiées par rapport à des essais intégrés en laboratoire et sur le terrain.

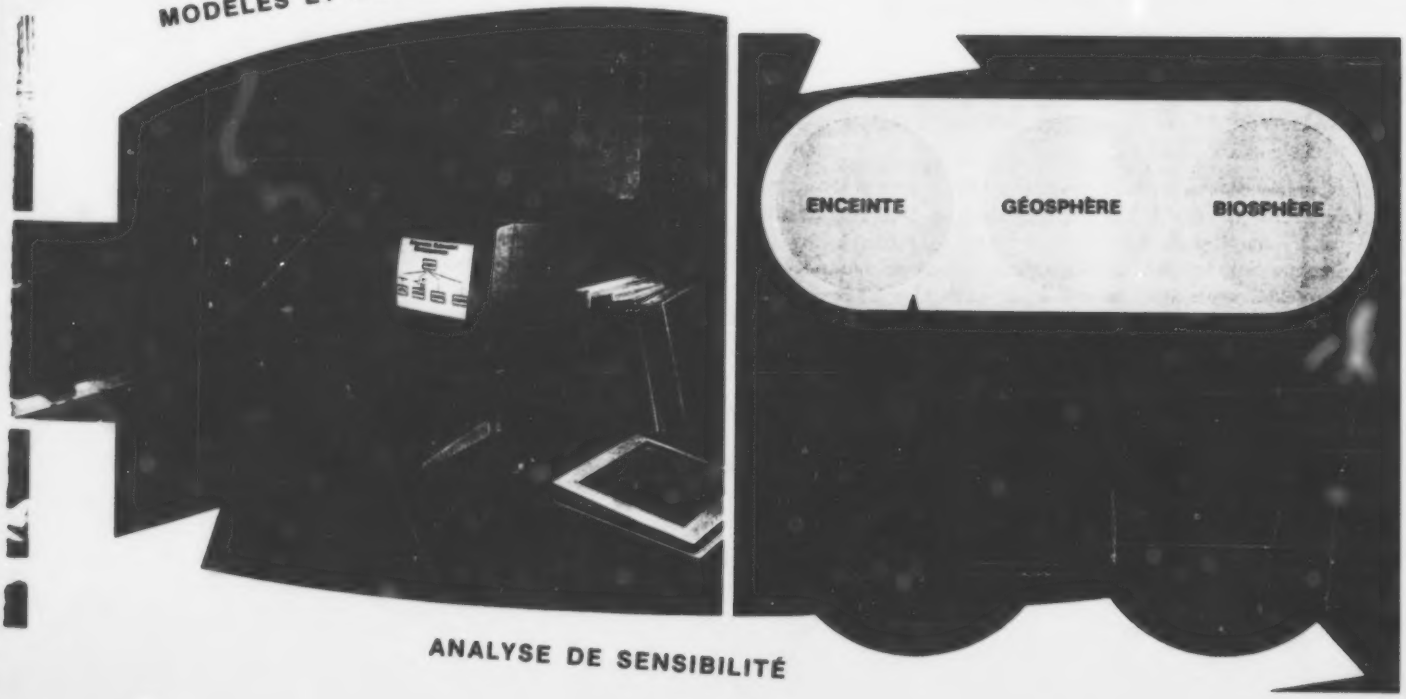
L'évaluation après fermeture tient compte d'une large gamme de caractéristiques, d'événements et de processus qui pourraient influer sur le système d'évacuation bien avant dans l'avenir. On se sert de modèles mathématiques et de simulations par ordinateur pour évaluer la gamme de conséquences possibles à long terme, pour savoir comment les incertitudes de nos connaissances et données influent sur ces conséquences et comment ces mêmes conséquences pourraient varier au cours du temps. On obtient ainsi une valeur des effets éventuels sur une personne à un certain moment dans l'avenir.



Dans la nature, les eaux circulent en un cycle fermé de condensation, d'écoulement et d'évaporation. Les eaux souterraines proviennent de chutes de pluie et de la neige fondue qui s'infiltrent dans le sol et la roche jusqu'à la nappe phréatique. L'eau souterraine contenue dans la roche de fond passe par les fractures et se déverse à la surface en des points de faible topographie tels que les lacs et rivières. Les particules infimes de matières radioactives qui pourraient, par la suite, être dissoutes dans l'eau souterraine, migreraient jusqu'aux eaux superficielles, sédiments et sols et seraient ainsi transférées aux plantes, aux animaux et à l'être humain par la chaîne alimentaire.

Les renseignements acquis à partir des études techniques et des travaux de recherche effectués sur les formes de déchets, les conteneurs, le remblai, le système de scellement d'étanchéité de l'enceinte, la roche réceptrice, les eaux souterraines et les voies de migration dans l'environnement, sont comparés et utilisés dans les évaluations des conséquences du système d'évacuation quant à la sûreté et l'environnement.

MODÈLES ET DONNÉES



ANALYSE DE SENSIBILITÉ

L'école de la nature

Afin d'évaluer la sûreté d'une enceinte d'évacuation de combustible nucléaire irradié, on doit pouvoir prédire comment tous les éléments du système d'évacuation se comporteront bien avant dans l'avenir. On doit donc comprendre les processus physiques et chimiques fondamentaux qui influent sur son comportement.

On a effectué des essais contrôlés en laboratoire et dans des aires de recherches géologiques sur le terrain en vue de mieux comprendre ces processus. Il est évident que les essais ne peuvent être effectués que pendant de courtes périodes en comparaison de la période pendant laquelle le système d'évacuation doit fonctionner. L'étude d'exemples naturels de conservation de matières pendant des milliers ou des millions d'années peut donner une certaine confiance à l'évaluation du comportement d'une enceinte d'évacuation à longue échéance.

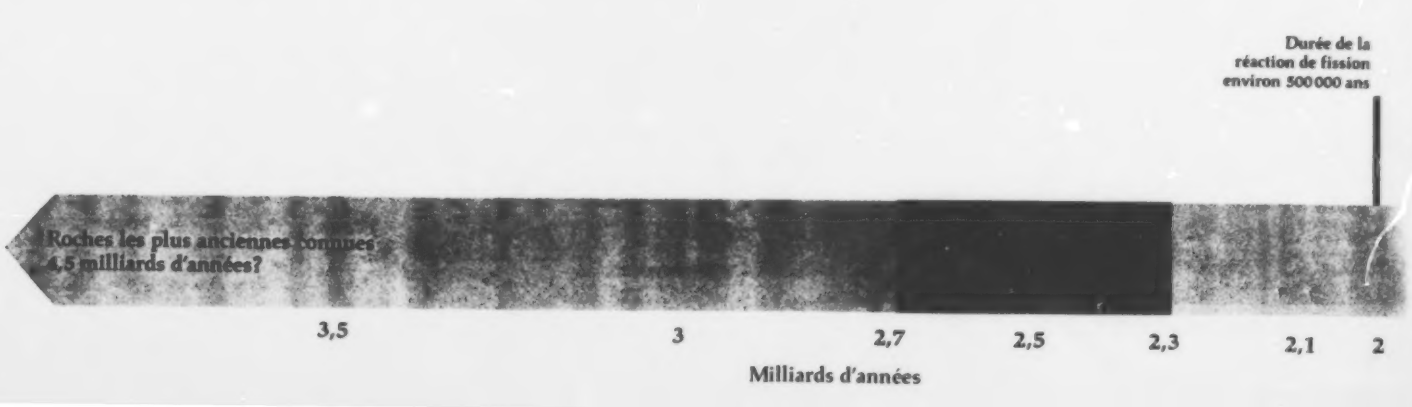
La compréhension des facteurs qui conduisent à l'immobilisation des matières radioactives dans des formations géologiques peut s'appuyer sur l'étude de gisements de minerai d'uranium radioactif naturel. Le gisement à forte teneur en oxyde d'uranium de Cigar Lake dans le nord de la Saskatchewan, est particulièrement intéressant.

Quelque 98 pour-cent du combustible nucléaire irradié est de l'oxyde d'uranium, le minerai d'uranium le plus courant dans la nature. La plupart des déchets contenus dans le combustible irradié sont liés à la structure de cet uranium et ne peuvent s'échapper si l'uranium ne se dissout pas. L'étude du gisement de minerai de Cigar Lake a révélé des cristaux d'uranium qui ne se sont pas dissouts depuis leur formation, il y a environ 1300 millions d'années. La composition chimique actuelle du minerai et des eaux souterraines correspond à la connaissance, acquise en laboratoire, des conditions nécessaires pour empêcher la dissolution et la migration de l'uranium. L'étude du gisement de minerai de Cigar Lake donne l'assurance que les systèmes géologiques peuvent retenir l'oxyde d'uranium pendant de très longues périodes.

Le combustible nucléaire irradié contient du plutonium, un élément à longue période qui peut être dangereux s'il est dissout dans l'eau souterraine, entraîné jusqu'à la surface du sol et ingéré par l'être humain. C'est pourquoi un autre gisement de minerai d'uranium, celui d'Oklo, au Gabon, en Afrique occidentale, a soulevé un intérêt scientifique considérable. À cet endroit, une mine actuelle d'uranium à ciel ouvert expose les restes de six réacteurs nucléaires naturels qui ont fonctionné il y a quelque 2000 millions d'années.

Ces réacteurs naturels ont créé les mêmes genres de sous-produits que ceux de nos réacteurs artificiels actuels, dont le plutonium. L'étude pour savoir comment ces produits sont maintenant répartis dans le gisement d'uranium, a donné des renseignements utiles sur la distance qu'ils pourrait éventuelle-

Il y a deux milliards d'années, à Oklo, en Afrique occidentale, un réacteur naturel a fonctionné sous terre dans un gisement d'uranium. Le plutonium radioactif produit par ce "réacteur" ne s'est pas déplacé de son point d'origine. Ce phénomène renforce la certitude des scientifiques que le stockage du combustible irradié dans des formations rocheuses stables peut être sans danger.

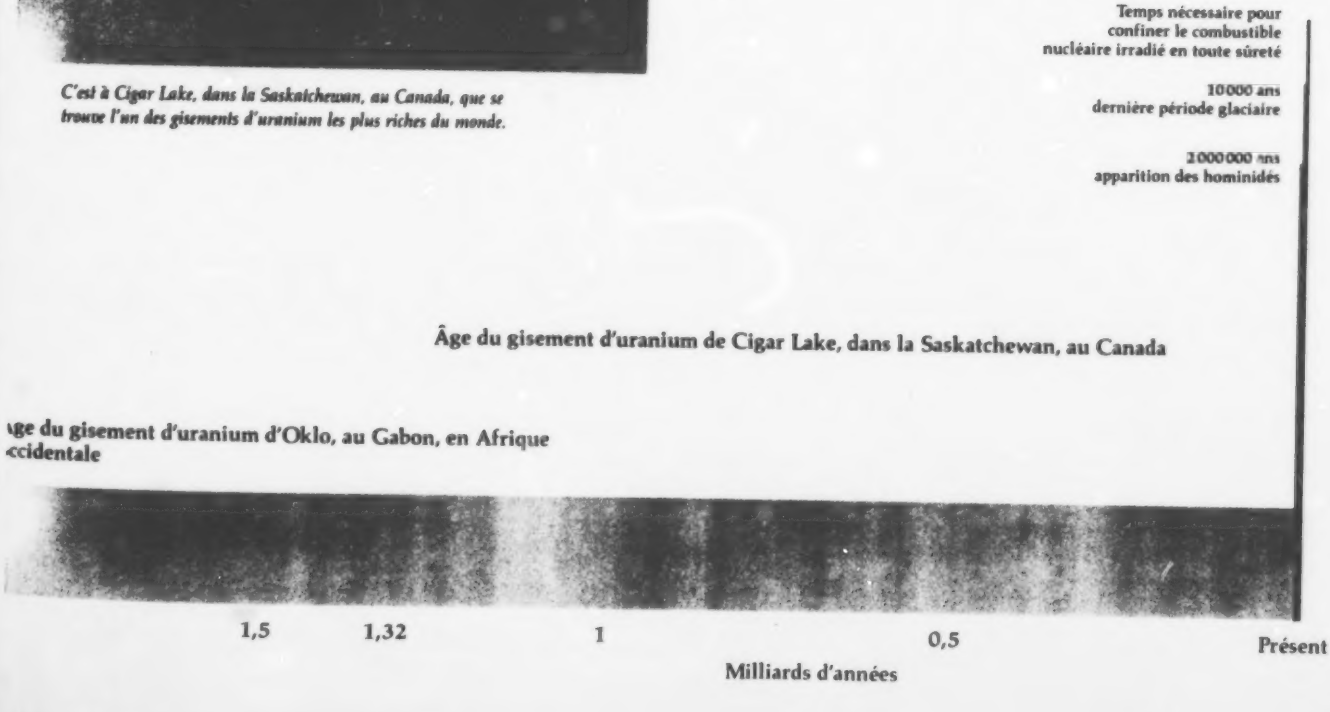


ment parcourir au cours de millions d'années. L'examen du minerai montre que les atomes de plutonium n'ont jamais quitté les grains de minerai d'uranium dans lesquels ils se sont formés. L'étude de ces anciens réacteurs d'Oklo, qui n'ont fait l'objet d'aucune mesure spéciale de gestion des déchets, donne la certitude que le plutonium contenu dans le combustible nucléaire irradié peut être confiné dans des systèmes géologiques jusqu'à ce qu'il ne soit plus dangereux.

Le concept d'évacuation canadien est de tasser de la bentonite (argile) autour des conteneurs de déchets car la bentonite gonfle lorsqu'elle est en contact avec l'eau et assure donc une étanchéité efficace. Toutefois, les conteneurs de stockage seront chauds (température allant jusqu'à 100°C), il y aura de fortes pressions à l'intérieur de l'enceinte d'évacuation et il pourrait y avoir de l'eau salée. Certaines argiles naturelles, telles que celles qui se trouvent à proximité de volcans ou à grande profondeur dans la croûte terrestre, ont été soumises à des conditions similaires. Les études de deux gisements d'argile de ce type, l'un en Sardaigne, sous-jacent à la roche volcanique et l'autre en Suède, à une profondeur de plus de 1000 mètres sous l'île de Gotland, ont montré que, comme on s'y attendait, les argiles ont subi un changement. Toutefois, même après des millions d'années, elles gonflent encore et ont conservé leurs propriétés de scellement d'étanchéité. Les études des argiles que l'on trouve au Canada ont montré que, même si l'argile se fissure par suite de dessèchement (perte d'humidité), elle gonfle à nouveau et redevient étanche d'elle-même lorsqu'elle entre en contact avec l'eau.

l Oklo et à Cigar Lake, l'argile entourant le gisement d'uranium ert à maintenir en place la plus grande partie de l'uranium, bien ue ces deux gisement renferment de l'eau souterraine. Le fer ontenu dans l'argile réagit avec l'eau souterraine et l'appauvrit en xygène; l'uranium ne se dissout pas dans de l'eau appauvrie en xygène.

C'est à Cigar Lake, dans la Saskatchewan, au Canada, que se trouve l'un des gisements d'uranium les plus riches du monde.



Examen et audiences publiques

Le concept d'évacuation du combustible nucléaire irradié a été soumis à un examen rigoureux à tous les stades de son développement. Il devra subir un autre examen avant que des décisions soient prises quant à son acceptabilité. Le rôle d'EACL est de développer le concept et de le défendre au cours du processus d'examen qui se déroulera ces sept prochaines années.

Examens extérieurs

La recherche sur les techniques d'évacuation a avancé au point où l'on établit, à des fins d'examen, le dossier technique du concept d'évacuation. Depuis le tout début de la recherche, plus de mille documents scientifiques ont été rédigés et mis à la disposition du public. Plus de 300 communications techniques ont été publiées dans des revues soumises au comité de lecture. Deux évaluations provisoires du concept ont été publiées et examinées et l'évaluation définitive sera soumise au public et aux organismes d'examen quand elle sera achevée.

Comité technique consultatif (CTC)

Le CTC, institué en 1979, assure un examen scientifique indépendant pendant toute la durée du programme. Ce comité conseille EACL sur l'étendue et la qualité du programme et fait des recommandations quant aux projets de recherches futurs. Ce comité indépendant se compose de certains des scientifiques les plus en vue au Canada, nommés par des associations professionnelles canadiennes.

Depuis 1979, le CTC publie, chaque année, un rapport public dans lequel il formule ses remarques et ses recommandations sur le programme.

Questions sociales

Certains des questions liées à la gestion du combustible nucléaire irradié ne peuvent pas être résolues par des moyens techniques ou scientifiques. Ces questions sociales et morales touchent la façon dont les êtres humains communiquent entre eux et dont ils coexistent en tant que membres de la société. On sait que la question de la gestion du combustible nucléaire irradié met à rude épreuve les mécanismes traditionnels de résolution des différences d'opinion entre divers secteurs de la société.

Dans le cadre du Programme de gestion des déchets de combustible nucléaire, EACL a mené des sondages d'opinion et a organisé des discussions avec des comités de défense d'intérêts particuliers et d'intérêts publics pour savoir quelles sont ces questions et connaître l'opinion de la société sur la manière de les résoudre. Le public aura aussi l'occasion de donner son point de vue sur les décisions des gouvernements touchant la gestion du combustible irradié au cours de la phase des audiences publiques du processus d'examen.

1989
Formation de la Commission d'évaluation environnementale et définition de l'étendue de l'examen. Nomination du Groupe d'examen scientifique.

1990
Étude d'impact environnemental rédigée par EACL.

Calendrier du processus d'examen

1991
Étude d'impact environnemental rendue publique et soumise à l'examen.

1991
Examen technique du concept d'évacuation effectué par le Groupe d'examen scientifique. Rapport présenté à la Commission d'évaluation environnementale.

1992
Examen du concept d'évacuation et tenue des audiences publiques par la Commission d'évaluation environnementale. Rapport présenté au ministre de l'Environnement et au ministre de l'Énergie, Mines et Ressources.

1993
Décision des gouvernements canadien et de l'Ontario sur l'acceptabilité/non acceptabilité du concept d'évacuation et sur les prochaines dispositions à prendre.

Rôle de la CCEA

L'organisme de réglementation de l'énergie nucléaire au Canada est la Commission de contrôle de l'énergie atomique. La CCEA délivre un permis d'exploitation aux sites où sont stockés les déchets radioactifs et a publié des directives réglementaires pour l'évacuation (stockage permanent). La condition fondamentale de ces directives est la réduction au minimum du fardeau de la gestion des déchets radioactifs pour les générations futures en:

- choisissant, dans le mesure où ceci est assez réalisable, des méthodes de stockage de déchets radioactifs qui ne reposent pas sur des réglements institutionnels à long terme en tant qu'élément de sûreté nécessaire;
- mettant en oeuvre ces méthodes de stockage au moment opportun en tenant compte des facteurs économiques, sociaux et techniques;
- s'assurant qu'il n'y aura aucun risque (prédit) pour l'avenir pour la santé de l'être humain et l'environnement, risque qu'on n'accepterait pas dans le présent;
- s'assurant que le risque radiologique (prédit) pour des personnes du public, lequel proviendrait d'une installation d'évacuation de déchets, ne dépasse pas un par million d'effets graves sur la santé par an. Cela s'exprime en dose individuelle maximale de 0,05 mSv par an.

On doit obtenir un permis de la CCEA avant de construire ou d'exploiter toute installation d'évacuation de combustible irradié. La CCEA doit prendre part à l'examen du concept d'évacuation qui sera effectué par le Commission d'évaluation environnementale.

Processus d'examen et d'évaluation en matière d'environnement (PEEE)

Le concept d'évacuation développé par EACL a été soumis au ministre fédéral de l'Environnement pour examen par la Commission d'évaluation environnementale dans le cadre du Processus d'examen et d'évaluation en matière d'environnement. Cette Commission sera aidée par le Groupe d'examen scientifique qui examinera les points techniques du concept d'évacuation.

La Commission fera un examen général qui portera sur diverses questions relatives à la gestion à long terme du combustible nucléaire irradié. L'examen couvrira différents milieux géologiques et les plans et programmes d'autres pays, dont leurs plans et calendriers d'implantation et de construction d'installations de gestion de déchets radioactifs.

La Commission doit traiter de sujets tels que les suivants:

- les critères appropriés selon lesquels la sûreté et l'acceptabilité d'un concept de gestion à long terme du combustible irradié devraient être évaluées;
- les critères généraux établis pour la gestion du combustible nucléaire irradié, par rapport à ceux établis pour les déchets provenant d'autres sources énergétiques et industrielles;
- les méthodes de gestion du combustible à long terme, dont le stockage à long terme avec possibilité d'intervention humaine permanente sous forme de surveillance, récupération et mesures correctives ainsi que le passage du stockage provisoire à l'évacuation (stockage) passive permanente;
- la mesure dans laquelle nous devrions soulager les générations futures du fardeau de veiller à ce combustible;
- les conséquences sociales, économiques et écologiques du concept canadien d'évacuation du combustible nucléaire irradié;
- l'utilisation de différents milieux géologiques et l'expérience acquise par d'autres pays en traitant leurs propres problèmes de gestion de combustible nucléaire irradié;
- les conséquences du recyclage ou d'autres procédés pour le volume de déchets;
- le processus et les critères recommandés en vue du choix d'un site pour une installation éventuelle de gestion à long terme de combustible irradié;
- les prochaines dispositions à prendre concernant la gestion du combustible nucléaire irradié au Canada.

Doses de rayonnement moyennes

Rayonnement ionisant naturel (à l'exclusion du radon)	0,80 mSv/an
Diagnostics médicaux	1,00 mSv/an
Radon	0,80 mSv/an
Retombées — essais d'armes nucléaires	0,04 mSv/an
Produits de consommation (aliments, produits à base d'eau, prothèses dentaires, lunettes, tabacs)	0,01 mSv/an
Voyage en avion (aller-retour Halifax-Vancouver)	0,04 mSv
Évacuation (stockage) permanente du combustible nucléaire irradié	0,03 mSv/an*
Dose totale moyenne	2,7 mSv/an

** C'est la directive réglementaire de la CCEA pour la dose annuelle moyenne reçue par une personne du groupe le plus exposé, laquelle habite au point de rejet d'une enceinte d'évacuation du combustible nucléaire irradié, dans un avenir lointain. Cette dose constitue une faible fraction de la dose d'exposition annuelle moyenne reçue de sources naturelles et artificielles de rayonnement ionisant représentées sur le diagramme à secteurs adjacent.*

Étant donné que les questions en cours d'examen sont complexes et qu'il faut beaucoup de temps pour obtenir la participation nécessaire du public, des organismes de réglementation et des scientifiques, l'examen se déroulera pendant plusieurs années.

La Commission doit tenir des audiences publiques en Ontario, au Québec et au Nouveau-Brunswick, provinces qui possèdent des réacteurs électronucléaires. Les personnes et les organismes intéressés pourront prendre part au processus d'examen et faire des démarches.

Les ministères de l'Environnement et de l'Énergie des gouvernements fédéral et provinciaux, de même que d'autres ministères et des organismes réglementaires tels que la CCEA, doivent participer au processus d'examen afin de s'assurer que le concept d'évacuation développé satisfait les prescriptions de leurs lois et règlements respectifs.

Processus de prise de décision du gouvernement

Après avoir reçu le rapport du Groupe d'examen, les gouvernements canadien et de la province de l'Ontario décideront si le concept d'évacuation du combustible nucléaire irradié est acceptable. S'ils jugent que le concept est inacceptable, ils pourraient décider d'ordonner de faire d'autres travaux de RD ou d'examiner différentes méthodes mises au point par d'autres pays. S'ils estiment que le concept est acceptable, ils pourraient alors se décider pour le calendrier des phases suivantes du programme d'évacuation dont la construction d'une installation d'évacuation.

Possibilités à envisager pour l'avenir

Si on juge que le concept d'évacuation est acceptable, il faudra au moins dix ans pour choisir un site d'installation d'évacuation, exécuter les recherches géologiques nécessaires sur le site et mener un autre processus d'examen écologique et d'autorisation de construction particulier au site.

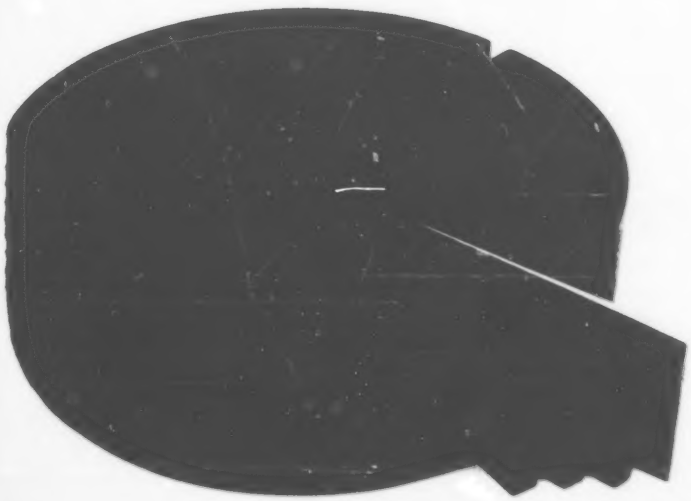
Aucune décision n'a encore été prise quant au lancement d'un tel processus dès la fin de l'examen du concept.

Il n'y a rien d'urgent, techniquement, qui nous oblige à commencer dès maintenant l'évacuation. Le combustible nucléaire irradié est actuellement en stockage provisoire sûr et ces méthodes de stockage provisoire peuvent être employées encore pendant de nombreuses décennies. Si l'on retarde l'évacuation, l'argent déjà amassé à cette fin peut continuer à servir aujourd'hui à d'autres fins, et le combustible irradié en stockage provisoire sera disponible pour le recyclage si cette solution devient économiquement viable dans l'avenir.

Toutefois, retarder l'évacuation présente certains risques. En effet, l'équipe technique qui est actuellement réunie se dispersera par la suite et il se pourrait que l'on ait à répéter certaines des recherches; les générations futures pourraient ne pas vouloir engager les fonds nécessaires à l'évacuation, et le problème pourrait ainsi se transmettre de génération en génération.

Les autres possibilités de gestion des déchets sont le stockage en surface ou souterrain sur un site qui pourrait servir ultérieurement à l'évacuation (de sorte que les déchets ne seraient déplacés qu'une seule fois) ou le commencement progressif de l'évacuation qui n'exigerait pas un grand engagement de ressources.

Les décisions quant aux lignes de conduite à adopter après l'acceptation du concept d'évacuation, seront prises par les gouvernements, les compagnies d'électricité et les organismes qui s'intéressent à la gestion des déchets radioactifs du point de vue de l'environnement et de la réglementation.



Liste des publications

La présente liste est une sélection de publications sur les recherches en gestion des déchets nucléaires. On peut se procurer, sur demande, toute publication auprès d'Énergie atomique du Canada limitée.

"A Race Against Time — Interim Report on Nuclear Power in Ontario," la Commission royale sur la planification de l'énergie électrique, A. Porter (président). Imprimeur de la Reine pour l'Ontario. Report No. ISBN 0-7743-2890-8 (1978).

"An Electrochemical Investigation of Localized Corrosion on Titanium in Chloride Environments," P. McKay and D. B. Mitton. *Corrosion*, Vol. 52, p. 41 (1985).

"Considérations géologiques pour le choix d'un site de dépôt souterrain de déchets hautement radioactifs," Commission de contrôle de l'énergie atomique. Texte de réglementation R-72 (1987).

"Déclaration commune du 4 août 1981," ministre de l'Énergie, Mines et Ressources Canada et ministre de l'Énergie de l'Ontario. (Impression et édition, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, Canada, K1A 0S9.)

"Déclaration commune du 5 juin 1978," ministre de l'Énergie, Mines et Ressources et ministre de l'Énergie de l'Ontario. (Impression et édition, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, Ontario, K1A 0S9.)

"Démystification de l'énergie nucléaire — Dixième rapport du Comité permanent de l'énergie, des mines et des ressources," B. Sparrow, député (présidente). Centre d'édition du gouvernement du Canada, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, Ontario (1988).

"Design on Multicomponent Systems Tests on High-Level Nuclear Waste Forms," R. B. Heimann and L. H. Johnson. *Advances in Ceramics*, Vol. 8, p. 337 (1984).

"Deuxième évaluation provisoire du concept canadien d'évacuation des déchets de combustible nucléaire. Volume 1: Sommaire," P. A. Gillespie, K. Harvey et D. E. Main. Rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-8373-IF (1985).

"Deuxième évaluation provisoire du concept canadien d'évacuation des déchets de combustible nucléaire. Volume 2: État de la question," P. A. Gillespie, D. M. Wuschke, V. M. Guvanasen, K. K. Mehta, D. B. McConnell, J. A. Tamm, R. B. Lyon. Rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-8373-2 (1985) (en anglais seulement).

"Deuxième évaluation provisoire du concept canadien d'évacuation des déchets de combustible nucléaire. Volume 3: Évaluation avant fermeture," K. Johansen, W. E. Dunford, K. J. Donnelly, J. H. Gea, B. T. Green, J. S. Nathwani, A. M. Quinn, B. G. Rogers, M. A. Stevenson, J. A. Tamm. Rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-8373-3 (1985) (en anglais seulement).

"Effets exercés par une rupture localisée de conteneur de déchets sur le transport des radionucléides à partir d'une enceinte souterraine de déchets nucléaires," S. C. H. Cheung et T. Chan. Rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-7796 (1983) (en anglais seulement).

"Engineered Barrier Research in Canada," K. Nuttall, J. A. Chadha et T. J. Carmichael. Proceedings of IAEA Conference on Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Waste, Hannover, FRG (RFA), March 1986, Paper No. IAEA-SM/21; également rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-9243 (1986).

"Étude d'évaluation du point de vue de l'écologie et de la sûreté pour la gestion des déchets de combustible nucléaire. Tome 1: Historique," R. B. Lyon, K. K. Mehta et T. Andres. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-121-1 (1981).

"Études d'évaluation du point de vue de l'écologie et de la sûreté pour la gestion des déchets de combustible nucléaire. Tome 2: Évaluation avant fermeture," K. Johansen, J. R. E. Harger et R. A. James. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-127-2 (1981) (en anglais seulement).

"Études d'évaluation du point de vue de l'écologie et de la sûreté pour la gestion des déchets de combustible nucléaire. Tome 3: Évaluation après fermeture," D. J. Wuschke, K. K. Mehta, K. W. Dormuth, T. Andres, G. R. Sherman, E. L. J. Rosinger, B. W. Goodwin, J. A. K. Reid et R. B. Lyon. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-127-3 (1981).

"Évacuation en profondeur des déchets de combustible: Historique et exigences réglementaires concernant le stade de l'évaluation du concept." Commission de contrôle de l'énergie atomique. Texte de réglementation R-71 (1985).

"Leaching Studies of Sphene-Based Glass-Ceramics," P. J. Hayward, W. E. Hocking, S. L. Mitchell and M. S. Stnachell. *Nuclear and Chemical Waste Management*, Vol. 5, p. 27 (1984).

"Les déchets hautement radioactifs au Canada: La onzième heure a sonné. Rapport du Comité permanent de l'environnement et des forêts," R. Brisco, député fédéral, (président), Centre d'édition du gouvernement du Canada, Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, Canada (1988).

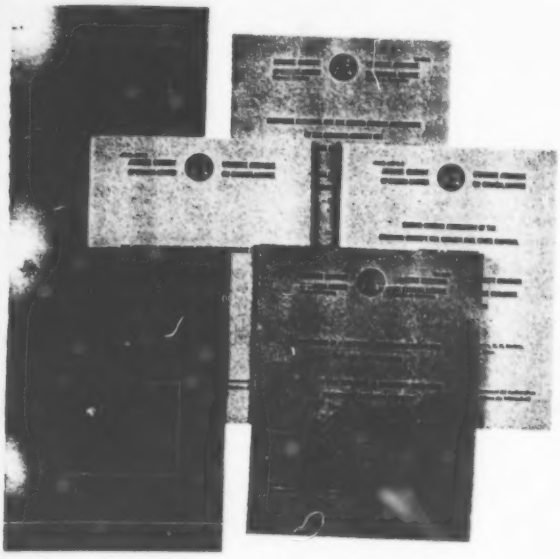
"Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and Reprocessing Wastes," Uranium Institute, London, England (1983).

"Ninth Annual Report of the Technical Advisory Committee on the Fuel Waste Management Program," L. W. Shemilt (président). Rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, TAC-9 (1988). Disponible auprès de L. W. Shemilt, McMaster University, Hamilton (Ontario) L8S 4L7 (en français prochainement).

"Normes de développement d'un logiciel de recherche scientifique," K. J. Hoffman et G. R. Sherman. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-291 (1985).

"Nuclear Fuel Waste Management Concept Preliminary Safety Assessment of the Pre-Closure Phase," J. S. Nathwani. Ontario Hydro Report No. 82175, Rev. 1, Nuclear Studies and Safety Department, Ontario Hydro, Toronto (1983).

"Objectifs de protection radiologique à long terme applicables à l'évacuation des déchets radioactifs." Rapport nº ISBN: 92-64-12604-4, Agence pour l'Énergie Nucléaire de l'OCDE, Paris, France (1984).



"Objectifs, exigences et lignes directrices réglementaires à long terme pour l'évacuation des déchets radioactifs." Document de réglementation R-104 (1987).

"Performance Assessment for Nuclear Fuel Waste Disposal — The Canadian Approach," E. L. J. Rosinger, B. W. Goodwin and D. M. Wuschke. Proceedings of "Waste Management '85," Tucson, Arizona, March 1985.

"Prédictions de perturbations hydrogéologiques dues à la construction du Laboratoire de Recherches Souterrain," V. Guvanasen, J. A. K. Reid et B. W. Nakka. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-344 (1985) (en anglais seulement).

"Public Consultation in the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program," R. S. Dixon, R. B. Anderson, M. A. Greber and J. A. Hillier. Proceedings of the Symposium on Waste Management, Tucson, Arizona, March 1987.

"Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle," K. W. Dormuth (rédacteur invité). Special Issue: *Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program*, Vol. 8, No. 2-3. (Harwood Academic Publishers GmbH USA, 1978).

"Radioactive Waste Management in Canada," W. T. Hancox, H. N. Isaac and J. Howieson. Proceedings of IAEA Conference on Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes, Hannover, FRG (RFA), March 1986, Paper No. IAEA-SM/2; également rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-9242 (1986).

"Radioactive Waste Management Policy and Its Implementation in Canada," T. E. Rummery, D. Lisle, J. Howieson and D. H. Charlesworth. Proceedings of IAEA Conference on Radioactive Waste, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/165, Vol. 1, p. 175; également rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-8033 (1983).

"Rapport semestrial de situation du programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire, 1er avril au 30 septembre 1986," compilé par E. D. Wright. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-425-4 (1988).

"Recherches sur l'immobilisation des déchets pour le programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire," G. G. Strathdee et A. G. Wikjord. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-148 (1982) (en anglais seulement).

"Report of the Royal Commission on Electric Power Planning" (Rapport de la Commission royale sur la planification de l'énergie électrique), A. Porter (président). Imprimeur de la Reine pour l'Ontario. Report No. ISBN 0-7743-4663-9 (1980).

"Research and Development for a Plutonic Rock Radioactive Waste Disposal Vault," K. W. Dormuth and J. S. Scott. Proceedings of the IAEA International Conference on Radioactive Waste Management, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/166, p. 291; également rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-7961 (1983).

"Sélection de groupes pour participation au programme de consultation publique sur la gestion des déchets de combustible nucléaire," Pat Delbridge Associates Inc. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-333 (1985) (en anglais seulement).

"Social and Political Aspects of Nuclear Fuel Waste Management," E. R. Frech. Proceedings of the Canadian Nuclear Association Annual Conference, Toronto, Ontario, June 1985.

"Stockage et transport du combustible irradié," R. A. McEachran, Compte rendu de la vingtième réunion d'information sur le Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire, 1985. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-375 (1985) (en anglais seulement).

"Systèmes à tampon et remblai pour les enceintes d'évacuation de déchets de combustible nucléaire," W. L. Wardrop and Associates Ltd. Dossier technique* d'Énergie atomique du Canada limitée, TR-341 (1985) (en anglais seulement).

"SYVAC — Un programme d'ordinateur destiné à l'évaluation des systèmes de gestion des déchets de combustible nucléaire en tenant compte de la variabilité des paramètres," K. W. Dormuth et G. R. Sherman. Rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-6614 (1981) (en anglais seulement).

"The Canadian Approach to Site Characterization for a Nuclear Fuel Disposal Vault," S. H. Whitaker, C. D. Davison, K. W. Dormuth and J. C. Scott. Proceedings of IAEA Conference on Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes, Hannover, FRG (RFA), March 1986, Paper No. IAEA-SM-289/33; également rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-9245.

"The Canadian Container Development Program for Fuel Isolation," K. Nuttall, J. L. Crosthwaite, P. McKay, P. M. Mathew, B. P. M. Teper, P. Y. Y. Maak and M. D. C. Moles. Proceedings of the Materials Research Society Symposium, Vol. 15, p. 677 (1983).

"The Canadian Underground Research Laboratory," G. R. Simmons, A. Brown, C. C. Davison, G. L. Rigby. Proceedings of IAEA International Conference on Radioactive Waste Management, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/167, p. 291; également rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-7961 (1983).

"The Management of Canada's Nuclear Fuel Wastes," A. M. Aikin, J. M. Harrison and F. K. Hare (président). Report of a study prepared under contract for the Minister of Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Ontario. Report EP 77-1.

"Twenty Years' Experience in Canada with Wet and Dry Storage and Irradiated CANDU Fuel," J. A. Remington, R. C. Oberth, C. E. L. Hunt. Proceedings of the IAEA International Conference on Radioactive Waste Management, Seattle, WA, May 1983, Paper No. IAEA-CN-43/429, Vol. 3, p. 107; également rapport d'Énergie atomique du Canada limitée, AECL-8032 (1983).

"Whiteshell Nuclear Research Establishment Immobilized Fuel Test Facility," M. A. Ryz. Transcript, *American Nuclear Society*, Vol. 44, p. 590 (1983).

*Les Dossiers techniques sont des rapports non confidentiels que l'on peut se procurer auprès du SDDS de la Société de recherche d'Énergie atomique du Canada limitée à Chalk River (Ontario) K0J 1J0.

On peut se procurer des publications auprès de l'Établissement de recherches nucléaires de Whiteshell d'Énergie atomique du Canada limitée à Pinawa (Manitoba) R0E 1L0.

Index

Absorption par les plantes, 29, 35
Accidents de la circulation, 32
Accords d'échange d'information, 12
Agence internationale de l'énergie atomique des Nations unies, 12
Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques, 12
Argile, 8, 37
Audiences publiques, 10, 38

Baie d'Hudson, 9
Baie de Fundy, 6
Barrières ouvragées (artificielles), 18, 19, 36, 37
Barrières naturelles, 18, 19, 36, 37
Biosphère, 28
Bioxyde d'uranium (UO_2), 14, 15, 16
Bouclier canadien (voir aussi bouclier précambrien), 8, 9, 10, 18, 20, 23, 24, 25, 29, 31, 34, 36
Bouclier précambrien, 9
Bowmanville, 6
Bruce A et B, 7

Camion de transport, 31
CANDU, 6, 7, 14, 15, 16
Capteur d'émission acoustique, 22
Caractérisation des sites, 24
Carbone, 14, 28
Carlsbad, Nouveau-Mexique, 12
Cellule de déformation triaxiale, 26
Centrale nucléaire de Darlington, 6
Centrale nucléaire de Pickering, 6, 7, 17
Centrale nucléaire de Pointe Lepreau, 6, 17
Centrales au charbon, 7, 14
Centrales nucléaires, 6, 8
Céramique, 16
Chaîne alimentaire, 14, 28, 34, 35
Château de transport, 30, 31, 32
Château de transport routier, 11
Choix d'un site, 41
Cigar Lake, Canada, 37
Cimentation, 21, 22, 31
Comité technique consultatif (CTC), 38
Combustible nucléaire irradié, 6, 8, 10, 14, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 31, 32, 37, 38, 40, 41
Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA), 30, 40, 41
Commission d'évaluation environnementale, 40, 41
Commission des communautés européennes, 12
Commission royale de l'Ontario sur la planification de l'énergie électrique, 8
Complexe nucléaire de Bruce, 7
Concept d'évacuation, 10, 18, 23, 31, 36, 37, 38, 40
Conditions d'accident, 32
Conséquences économiques, 34
Conséquences pour l'environnement, 34
Conséquences sociales, 34
Conteneurs de stockage à sec en béton, 17, 19
Conteneurs résistants à la corrosion, 18, 21, 30, 37
Contraintes mécaniques, 24
Contraintes thermiques, 24
Cuivre, 20

Densitomètre au laser, 27
Déplacement de la roche, 26
Diagnostics médicaux, 40
Dose(s) de rayonnement, 32, 34, 40
Douglas Point, 17

EACL (Énergie atomique du Canada limitée), 10, 11, 16, 17, 38
Eaux souterraines, 16, 18, 20, 23, 24, 25, 29, 30, 35, 37
Échantillons carottés, 23
Échelle de temps géologique, 8, 9
Effet biologique, 15
Enceinte d'évacuation (stockage permanent), 16, 18, 19, 20, 21, 28, 30, 31, 34, 36, 37, 40, 41
Énergie/électricité d'origine nucléaire, 6
Énergie Nouveau-Brunswick, 6, 10, 17
Énergie, Mines et Ressources Canada, 8
Enregistreur à intégration, 27
Essai de collision, 32
Essai de porosité, 27
Établissement de recherches nucléaires de Whiteshell, 17, 24
États-Unis, 12
Études géophysiques, 24
Études/mesures hydrogéologiques, 24, 25
Évaluation après fermeture, 34
Évaluation(s) provisoire(s) de l'environnement, 34
Exemples naturels, 36

Fer, 37
Finlande, 12
Fission, 14, 16
Fission nucléaire, 6
Formations géologiques sous les fonds marins, 8
Formations salines, 8
Forme de déchet, 18, 19
Fractures, 21, 23, 35
France, 16

Gabbro, 36
Gentilly-1, 17
Gentilly-2, 6
Gestion des déchets nucléaires, 8
Gisements de pétrole, 8
Gisements de potasse, 8
Gouvernement de l'Ontario, 6, 10, 11
Gouvernement canadien, 6, 10
Grande-Bretagne, 16
Granite, 8, 12, 23, 24, 25, 30, 34, 36
Grappe de combustible, 14
Grappes de combustible irradié, 8, 17, 18, 20
Groupe d'examen scientifique, 40
Groupe de travail Hare, 8

Hare, F. K., 8
Hélium, 29
Hydro-Québec, 6, 10, 17

Industrie nucléaire canadienne, 6
Installation d'essais du combustible irradié Climax, 12, 19
Installation d'essais hydrostatiques, 20
Installation d'essais de migration de radionucléides sur grands blocs, 27
Installation d'évacuation (stockage permanent), 18, 19, 20, 21, 28, 30, 31, 34, 36, 37, 40, 41
Installations de stockage permanent, 8
Iode, 29
Irradiation, 27, 29, 32

Jauge de déformation, 26

Kincardine, 7

"La gestion des déchets nucléaires du Canada", 8
Laboratoire dans la Roche de Grimsel (Grimsel Rock Laboratory), 12
Laboratoire de Recherches Souterrain (LRS), 21, 24, 25
Lac Huron, 7
Lac Ontario, 6, 7
Levés aéromagnétiques, 24
Levés au radar, 24
Levés au sonar, 24
Lixiviation, 19, 28

Machine à compression triaxiale, 21
Manitoba, 25
Marécage à sphaigne, 29
Matériau(x) de scellement d'étanchéité à base d'argile et de sable, 21, 30, 31
Matière(s) radioactive(s), 6, 18, 19, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 35, 36
Mesures de contraintes, 26
Minerai d'uranium, 18
Mines abandonnées, 8
Ministre/ministère de l'Environnement, 40
Modèles de calcul, 26, 28, 34
Morts-terrains, 36

Nevada, 12
Nouveau-Brunswick, 6, 41

Oklo, Afrique occidentale, 36, 37
Ontario, 6, 41
Ontario Hydro, 6, 7, 10, 11, 32

Pastilles de céramique, 14
Pastilles de combustible, 14, 16, 19
Période (désintégration radioactive), 14, 15, 16
Période glaciaire, 9
Perles de verre, 20
Permis, 34, 40
Phase avant fermeture, 34
Photogrammétrie de surface, 24
Piscine olympique, 14
Piscines de stockage remplies d'eau, 8, 11, 14, 17, 32
Pluies acides, 7
Plutonium, 15, 16
Porter, A., 8
Pression hydraulique, 26
Processus d'examen et d'évaluation en matière d'environnement, 40
Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire, 10, 11, 13, 34
Propriétés de la roche, 24
Protection par le béton, 15
Prototype de conteneur de déchets, 20
Puits, 21

Québec, 6, 41

Radioactivité, 14, 15, 34
Radon, 40
"Rapport Hare," 8, 10
Rayonnement ionisant naturel, 34, 40
Réacteur naturel, 36, 37
Recherche sur l'atmosphère, 28
Recherche sur l'environnement, 28
Recyclage (retraitement), 16, 41
Remblai, remblayage, matériaux de remblayage 18, 30, 31, 36
Réserves de pétrole de l'Alberta, 16
Retombées, 40
Roche réceptrice, 23, 24, 30, 36

Saint-Laurent (fleuve), 6
Sandia National Laboratories, 32
Scellement d'étanchéité des puits, 21
Scellement d'étanchéité de l'enceinte d'évacuation, 34, 37
Schistes argileux, 8
Sécurité, 34
Site d'essais du Projet Pilote d'Isolation des déchets (Waste Isolation Pilot Project), 12
Site d'évacuation, 10
Sites de forage, 23
Société de la Couronne, 10
Sorption, 23, 27
Spectomètre à infrarouge, 27
Stockage en surface, 6
Stockage provisoire, 10, 11
Stripa, Suède, 12
Suède, 12
Suisse, 12
Surcarottage, 26
Sûreté, 34

Titane, 20
Tomographie électromagnétique, 22
Toronto, 6
Transport du combustible nucléaire irradié, 10, 11, 34
Trois-Rivières, 6
Trous de forage, 21
Tubes en acier au carbone, 20
Tubes en zirconium, 14, 19

Uffen, R. J., 8
Union Soviétique, 16
Université de Toronto, 8
Université Queen's, 8
Uranium naturel, 14, 36

Véhicules pour les travaux souterrains, 30
Verre, 16
Voyages en avion, 40

Énergie atomique du Canada limitée
Bureau central
344, rue Slater
Ottawa, Ontario
K1A 0S4

Tél.: (613) 237-3270

Énergie atomique du Canada limitée
Société de recherche
Siège social
344, rue Slater
Ottawa, Ontario
K1A 1E5

Tél.: (613) 236-6444

Énergie atomique du Canada limitée
Société de recherche
Établissement de recherches nucléaires
de Whiteshell
Pinawa, Manitoba
R0E 1L0

Tél.: (204) 753-2311

Énergie atomique du Canada limitée
Société de recherche
Laboratoires nucléaires de Chalk River
Chalk River, Ontario
K0J 1J0

Tél.: (613) 584-3311

Énergie atomique du Canada limitée
Opérations CANDU
Sheridan Park Research Community
Mississauga, Ontario
L5K 1B2

Tél.: (416) 823-9040

Énergie atomique du Canada limitée
Opérations CANDU
1135, rue Metcalfe
2e étage, Édifice Sun Life
Montréal, Québec
H3B 2V6

Tél.: (514) 871-1116